



Escola Politècnica Superior
d'Edificació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

ENGINYERIA DE L'EDIFICACIÓ

PROJECTE FINAL DE GRAU

LA PALLA COM A MATERIAL DE CONSTRUCCIÓ: PRESTACIONS MECÀNIQUES, TÈRMIQUES I FRONT AL FOC

Projectista/es: Roca Valles, Andreu

Director/s: Lacasta, Ana María i Rosell, Joan Ramon

Convocatòria: juny 2012

RESUM

L'objectiu d'aquest treball és aportar coneixement tècnic i agrupar l'existent en l'entorn de la palla com a material de construcció.

El treball consta de dues parts. Primerament, una part on s'ha realitzat un estudi de cerca d'informació; un estat de la qüestió de la palla com a element constructiu i arquitectònic, descrivint les característiques tècniques del material mitjançant els assajos que s'han dut a terme.

A la segona part del present treball s'han realitzat diferents tipus d'assaig amb elements compostos que incorporen palla. Els lligams utilitzats per fer els assajos han estat la calç, el guix i la terra.

S'han fabricat trenta-sis provetes en forma de placa, amb els diferents lligams i amb diferents percentatges de palla. Aquestes provetes s'han assajat amb un conductímetre que ens ha permès veure com la incorporació de palla en els elements compostos afavoreix la reducció de la conductivitat tèrmica.

Amb les mateixes plaques s'han realitzat assajos de resistència al foc, on s'ha pogut veure l'influència de la palla.

També s'han fabricat setanta-dos provetes prismàtiques, amb els diferents lligams i amb diferents percentatges de palla. Aquestes s'han assajat mecànicament, la meitat a temperatura ambient i l'altra meitat després de passar pel forn a 250°C. El que s'ha pogut comprovar, com era d'esperar, és que els elements, que han passat pel forn, perden molt les seues capacitats mecàniques.

Com a conclusió, val a dir, que l'addició de fibres de palla no millora les capacitats mecàniques dels materials compostos, però el seu comportament com aïllant és millor que els lligams sense fibres.

Seria interessant investigar una possible combinació de materials compostos amb fibres de palla amb materials resistents mecànicament i al foc.

ABSTRACT

The aim of this paper is to provide technical knowledge and group the existing about of the straw as a building material.

The work consists of two parts. First, a part of information search, a state of the art of straw as a material of construction and architecture, describing the technical characteristics of the material through the tests carried out.

In the second part of this work, we have made various types of test in composite elements that incorporate straw. The materials used to produce the samples have been lime, gypsum and clay.

Thirty-six samples were fabricated in the form of square with different bonds and different percentages of straw. These samples were tested with a conductivimetre has allowed us to see how the incorporation of straw in the composite elements favors the reduction of thermal conductivity.

The same squared samples were used in fire resistance tests, which could see the influence of straw.

We have also made seventy-two prismatic samples with different bonds and different percentages of straw. One half of these have been tested mechanically at room temperature and the other half after passing through the oven at 250 °C. What we have seen, as expected, is that samples that have passed through the oven, they lose much of its mechanical capabilities.

In conclusion, we can say that adding straw fibers does not improve the mechanical capabilities of composite materials, but their behavior as insulation is better.

It would be interesting to investigate a possible combination of straw composites with other mechanically resistant materials and fire.

ÍNDEx

RESUM	1
ABSTRACT	2
INTRODUCCIÓ	7
 CAPÍTOL 1: ESTAT DE LA QÜESTIÓ	
1.1. INTRODUCCIÓ	8
1.1.1. Definició	8
1.1.2. Cultiu	9
1.1.3. La palla en construcció	9
1.1.4. Característiques de les bales de palla	9
1.2. CONSTRUCCIÓ AMB BALES DE PALLA	11
1.2.1. Breu història	11
1.2.2. Beneficis de la construcció amb bales de palla	12
<u>1.2.2.1. Cicle de vida</u>	12
<u>1.2.2.2. Facilitat de construcció</u>	13
<u>1.2.2.3. Sostenibilitat</u>	13
1.2.3. Preocupacions comunes	13
<u>1.2.3.1. Humitat</u>	13
<u>1.2.3.2. Contra incendis</u>	14
<u>1.2.3.3. Insectes i rosegadors</u>	14
<u>1.2.3.4. Fongs i al·lèrgies</u>	15
<u>1.2.3.5. Fixacions a les parets</u>	15
1.2.4. Sistemes constructius	16
<u>1.2.4.1. Nebraska, portant o autoportant</u>	16
<u>1.2.4.2. Pilars i bigues o no portant</u>	19
<u>1.2.4.2.1. Columnes</u>	22
<u>1.2.4.2.2. Altres sistemes: El GREB i els prefabricats</u>	23

<u>1.2.4.2.3. Folrar una estructura</u>	24
<u>1.2.4.3. Sistemes híbrids</u>	25
1.2.5. Normativa	26
<u>1.2.5.1. Introducció</u>	26
<u>1.2.5.2. Normativa a nivell mundial</u>	26
<u>1.2.5.3. La construcció amb palla a l'estat espanyol</u>	27
1.3. PANELLS I BLOCS DE PALLA	28
1.4. ARREBOSSATS	30
1.5. TERRA AMB PALLA	31
 CAPÍTOL 2: ASPECTES TÈCNICS	
2.1 INTRODUCCIÓ	32
2.2. BALES DE PALLA	33
2.2.1. Aspectes estructurals	33
2.2.2. Resistència al foc (EI)	38
2.2.3. Comportament tèrmic	39
<u>2.2.3.1. Conductivitat tèrmica</u>	39
<u>2.2.3.2. Inèrcia tèrmica</u>	40
2.2.5. Comportament acústic	42
<u>2.2.5.1. Aïllament acústic</u>	42
<u>2.2.5.2. Absorció acústica</u>	42
2.2.6. Resistència als sismes	43
2.3. PANELLS, BLOCS I MURS PREFABRICATS DE PALLA	44
2.4. TERRA AMB PALLA	44
2.4.1. Resistència als sismes	44

CAPÍTOL 3: CAMPANYA EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUCCIÓ	45
3.2. PROCES DE PREPARACIÓ DE LES PROVETES	45
3.2.1. Introducció	45
3.2.2. Materials utilitzats	45
<u>3.2.2.1. Guix</u>	45
<u>3.2.2.2. Calç</u>	47
<u>3.2.2.3. Terra</u>	49
<u>3.2.2.4. La palla</u>	51
3.2.3. Tipus de provetes	52
3.2.4. Fabricació de les provetes	52
<u>3.2.4.1. Carbonatació de les mostres de calç</u>	53
3.3. ASSAJOS REALITZATS	54
3.3.1. Assaig de conductivitat tèrmica	54
3.3.2. Resistència al foc	55
3.3.3. Comportament mecànic	58
<u>3.3.3.1. Flexo-tracció simple</u>	62
<u>3.3.3.2. Compresió</u>	65
3.4 RESULTATS	68
3.4.1. Assaig de conductivitat tèrmica	68
3.4.2. Resistència al foc	71
3.4.3. Comportament mecànic	75
CONCLUSIONS	79
AGRAÏMENTS	80
BIBLIOGRAFIA	81

ANNEX I: TAULES DE LES PROVETES FABRICADES

ANNEX II: TAULA RESULTATS DEL CONDUCTIVIMETRE

ANNEX III: GRÀFIQUES RESISTÈNCIA AL FOC

ANNEX IV: TAULES RESULTATS ASSAIG FLEXOTRACCIÓ

ANNEXV: TAULES RESULTATS ASSAIG COMPRESIÓ

INTRODUCCIÓ

Amb voluntat de reduir l'impacte ambiental en l'edificació i construir d'una manera més sostenible, s'està començant a incorporar a la construcció materials amb baixa empremta ecològica, presents en la construcció tradicional però, ara, emprant els coneixements i les tècniques que tenim en l'actualitat. En aquest sentit, apareix un material de rebuig agrícola, les fibres vegetals.

Existeixen al voltant de cinquanta espècies de plantes conegudes com a font de fibres vegetals útils per a la construcció. En general la font més important de fibres vegetals que tenim, ve del cultiu dels cereals. La fibra vegetal que s'obté dels cereals és la palla.

En aquest estudi ens centrarem en la utilització de la palla com a material de construcció. La palla, a més de ser renovable, ens proporciona una alternativa als sistemes constructius convencionals, que generen un gran impacte ambiental.

Així, l'objectiu d'aquest treball és, en primer lloc, agrupar el coneixement tècnic existent al voltant de la palla com a material de construcció, explicant els diferents usos i sistemes constructius de la palla així com les característiques tècniques del material; en segon lloc, aportar nous coneixements mitjançant una campanya experimental on coneixerem el comportament tèrmic, mecànic i front al foc de la palla en sistemes compostos.

CAPÍTOL 1: ESTAT DE LA QÜESTIÓ

1.1. INTRODUCCIÓ

1.1.1. Definició

Es considera palla la tija de certes plantes que serveix d'estructura entre les arrels i el gra. Existeixen moltes plantes que tenen una tija a la qual es pot denominar palla, però solament algunes es poden embalar; com, per exemple, el blat, l'arròs, l'ordi i la civada. El blat és el tipus de palla més utilitzada degut a la seva producció a gran escala.

La composició química de la palla és molt similar a la de la fusta: està composta per cel·lulosa, hemicel·lulosa, lignina i sílice. La seva estructura tubular li dóna elasticitat i l'aire que hi ha dins la tija, la seva capacitat aïllant. La palla d'arròs és la més resistent a l'aigua, degut al seu alt contingut en silicats, superiors al 20%[1].

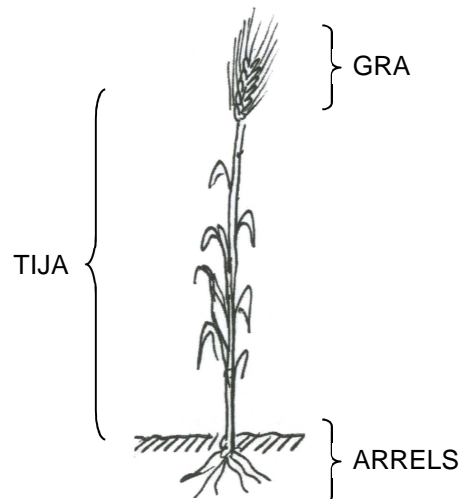


Fig.1.1: Estructura de la planta del blat. Font: Luis Urkia (2009)

A diferència de la fusta, la palla és un material que la natura produeix anualment i tenim disponible a moltes parts del món. En finalitzar el seu ús, es pot retornar a la biosfera sense cap tipus d'impacte.

1.1.2. Cultiu

Els cultius existents a l'Estat, que produeixen fibres vegetals en forma de palla, són: l'ordi, el blat, l'arròs, la civada i el sègol (per ordre d'importància) [2].

Generalment, la sembra té lloc durant la tardor i el fruit es recull amb l'arribada de l'estiu. Les dates varien segons el tipus de cultiu.

Tradicionalment, la recol·lecció del gra es realitzava manualment. Abans es segaven els camps amb la falç i es portaven a l'era, on es separava la palla del gra; avui dia tot el procés de recol·lecció i embalat està mecanitzat.

1.1.3. La palla en construcció

L'ús més comú que se li dona a la palla en construcció és la realització de tancaments en forma de bala. Aquests tancaments poden ser estructurals o no, segons el sistema de construcció.

Per protegir les bales es recobreixen amb un arrebossat. N'hi ha de diferents tipus i alguns poden incorporar la mateixa palla, ja que absorbeix les retraccions i evita l'esquerdat.

La palla està present també en diferents sistemes de construcció com la tova i el cob. Aquests sistemes es basen en la terra com a material aglutinant. La palla ajuda a absorbir les retraccions, evitar l'esquerdat i proporciona solidesa al material.

Amb o sense matèria aglutinant, es fabriquen uns panells de palla comprimida, que es fan servir per a envans i falsos sostres. El sistema constructiu d'aquests panells és semblant als panells de cartró pedra amb guies metàl·liques.

1.1.4. Característiques de les bales de palla

El procés d'embalar les bales es realitza amb la màquina embaladora que talla, compacta i lliga la palla. Segons el tipus d'embaladora varien les dimensions de la bala, la seva densitat i el número de cordes.

Les cordes poden ser de polipropilè o de filferro, encara que en algunes ocasions les trobem lligades amb corda de fibra vegetal. Aquesta última és rebutjada per la majoria de constructors perquè és més cara i, a més, presenta una baixa resistència a la tensió.

Segons la màquina embaladora, hi ha diferents tipus de bales amb dimensions i pes que varien segons amb el nombre de cordes amb què estan lligades.

La bala de palla petita està lligada amb dues cordes i té unes dimensions aproximades de 35-45 x 35 x 90-100 i un pes d'entre 15 i 30kg.

La macrobala, de grans dimensions (70-75 x 120 x 250-260 cm), està lligada amb sis cordes i, tenint en compte la seva densitat, pot arribar a pesar fins a 700kg.

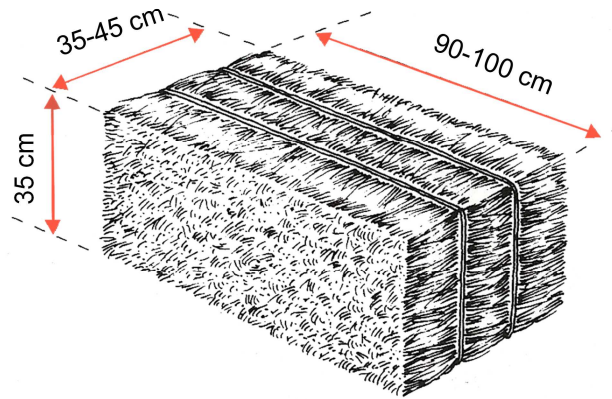


Fig.1.2 : Dimensió aproximada de la bala de palla de dues cordes . Font: G. Minke (2006)

1.2. CONSTRUCCIÓ AMB BALES DE PALLA

Aquest tipus de construcció és relativament nou i és originari de Nebraska. S'utilitzen les bales de palla com a tancament i, de vegades, tenen funció estructural. Les bales es protegeixen amb un recobriment, generalment un arrebossat.

El més normal en aquest tipus de construcció és utilitzar bales petites perquè són menys pesades i més fàcils de moure. S'ha de puntualitzar, però, que n'hi ha que prefereixen les macrobales pel seu volum i per la seva densitat superior. Les bales es posen de gairell i s'han de moure amb un toro.

1.2.1. Breu història

La construcció en bales de palla s'inicia a Nebraska amb l'aparició de les primeres màquines enfardadores. La falta de materials de construcció a la zona, com ara la fusta, va portar a construir amb bales de palla.

Les primeres construccions van ser considerades temporals però, en adonar-se de les seves propietats tèrmiques les van arrebossar i, molt aviat, es van convertir en residència permanent.

La primera construcció documentada en bales de palla es va realitzar a Nebraska el 1896[3]. El sostre d'aquestes primeres cases descansava directament sobre els murs de bales, sense cap tipus d'estructura de fusta. Aquest sistema seria conegut després com a "tècnica Nebraska".



Fig.1.3: Casa Simonton, Purdum, Nebraska, 1908.Font: Cobijo (2003)

Les construccions més antigues, habitades encara, daten del 1900 al 1914[4]. La construcció més antiga realitzada a Europa i, segurament la primera de dues plantes, va ser construïda l'any 1921 a França[5].

Entre els anys setanta i vuitanta es van editar als Estats Units una sèrie de publicacions sobre el tema[6] i van aparèixer nous sistemes constructius. Un exemple d'això és l'ús de les bales com a revestiment en construccions de fusta.

L'any 1993 comença a editar-se el periòdic trimestral als Estats Units *The Last Straw: The Journal of the Straw Bale Construction*[7]. A partir d'aquest moment es produeix un gran augment de la construcció en bales de palla. Aquest increment fou tan evident que fins i tot en alguns estats dels Estats Units es van crear reglaments especials[8]. També van realitzar-se investigacions sobre transmissió tèrmica, capacitat de càrrega, resistència al vent, qualitats antisísmiques i resistència al foc.

En l'actualitat, existeixen cases de palla arreu del món. A Europa hi ha la *European Strawbale Network* o *Red Europea de Construcción con Fardos de Paja* que van ser fundades l'any 1998[9]. Arreu de l'estat espanyol hi ha construccions de palla fetes recentment, així com també alguns projectes per a construir-ne de noves. També existeix la RCP (Red de Construcción con Paja), la primera xarxa hispana, que va ser fundada l'any 2006[10] i que ja ha realitzat dos trobades.

Actualment la construcció en bales de palla gaudeix d'una bona salut a l'estat espanyol i, en temps de crisi, representa una alternativa econòmica als sistemes de construcció actuals.

1.2.2. Beneficis de la construcció amb bales de palla

1.2.2.1. Cicle de vida

Si es fa l'anàlisi del cicle de vida de la construcció amb bala de palla es pot observar el baix impacte mediambiental que té aquest sistema constructiu.

Al ser un producte local, per a la producció de bales de palla i el seu transport es necessita molta menys energia que per a la producció d'altres elements constructius. Val a dir que, a més, durant el creixement de la planta, amb la fotosíntesi, s'està absorbint CO₂ i, per tant, s'està fent una aportació favorable al medi ambient.

Durant l'ús d'un habitatge amb bales de palla, la seva capacitat aïllant ens evita un alt consum en sistemes de calefacció. Els habitatges aïllats amb bales de palla poden arribar a l'estàndard *passivhaus*[11]. Aquest comú es dona quan el consum per a l'acondicionament tèrmic de la casa està per sota dels 15kWh/m².

En la desconstrucció d'una casa d'aquest tipus, l'eliminació de la palla no genera impacte. Per exemple, la palla es pot fer servir com adob per al jardí o per a airejar la terra dels cultius.

1.2.2.2. Facilitat de construcció

Les bales de palla són fàcils de modificar, flexibles per ser utilitzades en diferents formes, sòlides i fàcils de conservar en bon estat. No es necessiten ferramentes cares ni complicades, ni tampoc personal especialitzat per a la seva construcció. És relativament fàcil la seva autoconstrucció i la seva adquisició no serà un problema, ja que hi podrem accedir per un mòdic preu a qualsevol part del món.

1.2.2.3. Sostenibilitat

Respecte de la fusta, la palla és un material que pot créixer en un període de temps curt i la naturalesa ens la proporciona periòdicament.

En moltes zones agrícoles la palla és un producte de rebuig. L'aprofitament d'aquest rebuig en la construcció d'habitatges podria suposar una reducció en l'ús de materials aïllants, com les llanes minerals o aïllants sintètics, amb un balanç mediambiental negatiu[12].

1.2.3. Preocupacions comunes

A l'hora de construir una casa amb bales de palla s'han de tindre precaucions en una sèrie de punts que, si estan resolts de forma correcta, no ens portaran cap tipus de problema.

1.2.3.1. Humitat

L'experiència ha demostrat que els edificis de bales poden resistir amb èxit a climes humits[13]. No obstant, és molt important protegir les bales de la humitat. Els desperfectes que pot ocasionar l'aigua a les bales és el major enemic potencial per a una estructura de bales. La humitat pot arribar a provocar la completa desintegració de les bales de palla.

S'han de dissenyar els edificis per protegir les parts més vulnerables a l'aigua. Les parts més vulnerables d'aquest tipus de construcció són la part superior i la part inferior. En el procés de construcció s'ha de col·locar el sostre després de la realització de les parets el més prompte possible. Si no fóra possible, s'hauria de cobrir la part superior dels murs.

També és de vital importància protegir la part inferior del mur. La primera filada de bales anirà aixecada uns 20cm del nivell de terra i es col·locarà una capa impermeable

per sota de la primera filada. És recomanable, també, posar una capa impermeabilitzant en altres zones vulnerables, com en els ampits de les finestres.

A l'hora de rebre les bales de palla a l'obra, s'ha d'estar segur que les bales estan seques, ja que en una bala amb un grau d'humitat de més d'un 15% poden proliferar fongs que poden descompondre la palla.

1.2.3.2. Contra incendis

Les construccions amb bales de palla tenen més resistència al foc del que és pugui creure, gràcies a la protecció que dona l'arrebossat[14]. El perill amb el foc és més important durant la construcció dels murs. El més perillós durant l'obra és la palla solta que cau al moure les bales. Per defugir el perill que suposen, s'evitarà qualsevol font que pugui generar foc durant l'obra, s'escombrarà la palla solta i s'arrebossaran els murs el més ràpid possible.

Aquest tema, es tractarà amb més profunditat més endavant, en el capítol sobre la resistència al foc, dins l'apartat d'aspectes tècnics.

1.2.3.3. Insectes i rosegadors

Per als rosegadors la palla no és cap aliment. La palla és la tija d'una planta a la que s'ha extret el fruit i, per tant, no hauria de contenir aliment per atreure als rosegadors[15]. Una vegada els murs estan revocats tampoc hi ha perill de que dipositen el seu niu a la palla. Novament, el perill existent amb els rosegadors està en el moment de construcció dels murs, abans de l'arrebossat. S'ha de procurar que l'arrebossat segelli les bales, que no hi hagi cap lloc per on puguin entrar els animalons.

Pel que fa als insectes, com ara els tèrmits, la palla tampoc li serveix com aliment. Cap la possibilitat de que se la mengen, però prefereixen com a aliment la fusta. A més, l'arrebossat també ens protegeix la palla. Per a una protecció extra contra els tèrmits hi ha diferents tipus de solucions químiques que, normalment, s'apliquen a zones on els tèrmits són un problema també per als habitatges convencionals.

1.2.3.4. Fongs i al·lèrgies

Si un mur està ben construït no hi ha perill que els fongs proliferin en la palla. Per a una correcta execució dels murs, les bales han d'estar seques i amb un grau d'humitat inferior al 15%. En alguns casos es posa una barrera de vapor interior perquè deixi passar la humitat ambient fent de la superfície exterior transpirable, així, la possible condensació que es pugui generar, surt a l'exterior.

Durant la construcció de la casa poden produir-se algunes reaccions al·lèrgiques, per tant, en aquets casos es treballarà amb mascareta. El perill desapareix novament quan el mur està arrebossat.

1.2.3.5. Fixacions a les parets

La fixació d'elements a la paret de bales de palla és complicada perquè els tirafons solament tenen l'arrebossat per a suportar-se. Aquest problema es pot solucionar prevenint el lloc on es van a col·locar aquets elements i disposar, inserits en la bala, elements per al suport. Un bon exemple serien els llistons de fusta.

1.2.4. Sistemes constructius

Existeixen bàsicament tres sistemes de construcció de murs amb bales de palla: el sistema portant o autoportant, on la palla actua com a element de càrrega, tancament i aïllant; el sistema de pilars i bigues o no portant, on l'element de càrrega és un marc estructural fet d'algun altre material (fusta, ferro, pedra, maons...) i la palla fa solament la funció de tancament i aïllant. I per últim, el sistema híbrid, que de diferents maneres, combina els dos sistemes anteriors, intentant agafar el millor de cadascun.

1.2.4.1. Nebraska, portant o autoportant

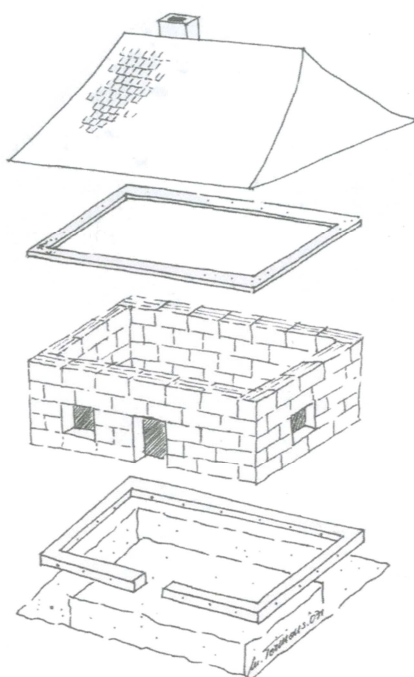


Fig.1.4 : Esquema del sistema Nebraska. Font: Rikki Nitzkin i Maren Tremens (2010)

En aquest sistema són els murs de bales de palla els que suporten la càrrega dels forjats i la coberta. Transmeten aquestes càrregues a la fonamentació. Els murs van coronats amb un cercol perimetral de fusta, que s'amarra amb uns tensors que precomprimeix i estabilitza la palla. La coberta descansa sobre el cercol. Un mur fet amb bales ben comprimides (més de 90 kg/m³) pot resistir més de 500 kg/m[16].

El mètode de construcció d'aquest sistema és el més senzill, no es necessiten molts coneixements previs i, per tant, és el sistema més fàcil per als autoconstructors.

El disseny d'una casa amb aquest sistema constructiu és relativament fàcil, però s'ha de tenir en compte la naturalesa de la palla i les limitacions de la mateixa.

La palla és un material tou, que es comprimeix depenent de la densitat de la bala. Aquesta compressió genera moviments que s'han de considerar a l'hora de fer les portes i finestres. S'han de deixar espais per dalt o per baix, que ens assumiran la compressió del mur. No podrem començar a arrebossar fins que les bales no s'hagin estabilitzat.

Les portes i les finestres han d'estar allunyades com a mínim una bala dels cantons per evitar la formació de panxes en el mur. A més, l'àrea dels forats de portes i finestres no ha de superar el 50% de la superfície del mur.

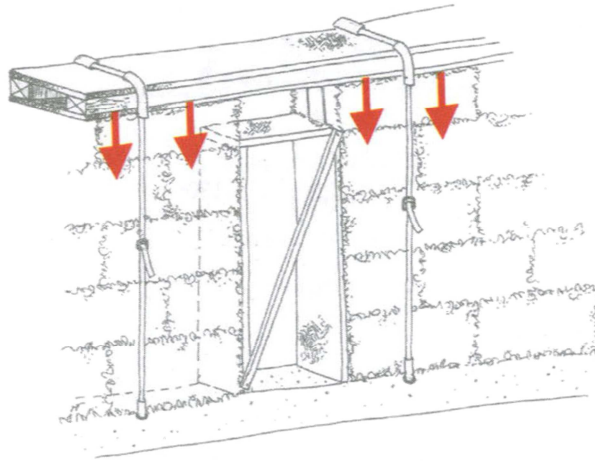


Fig.1.5: "S'han de deixar espais per dalt o per baix, que ens assumiran la compressió del mur"
Font: Rikki Nitzkin i Maren Tremens (2010)

Com a dada orientativa, la normativa vigent a Arizona[17] ens diu que, per a saber l'altura màxima del mur, s'ha de multiplicar la seva amplada per 5,6. Així per a un mur de 0,5m d'amplada es recomana una altura màxima de 2,8m.

Pel que fa a la longitud màxima del mur, la mateixa normativa ens diu que s'ha de multiplicar l'amplada del mur per 13. En aquest cas, en un mur realitzat amb bales de palla petites, la longitud màxima recomanada serà de 6,5m.

En l'actualitat ja existeixen cases amb aquest sistema constructiu de dues plantes, que estan donant molt bons resultats[18].

Altres sistemes de murs autoportants

A partir del sistema bàsic Nebraska s'han desenvolupat moltes i diferents variants basades en l'experiència i sempre amb la voluntat de millorar. D'aquests sistemes en destacaria tres: El sistema ISAMA, el sistema Tom Rijven i un altre amb les bales de palla utilitzats com a maons.



Fig.1.6 : Submergeint les bales en cal (sistema ISAMA). Font: Rikki Nitzkin i Maren Tremens (2010)

Ismael Caballero[19] (enginyer) va desenvolupar la tècnica ISMANA[20] després d'haver tingut problemes amb el foc i els rosegadors en les primeres construccions. El sistema es basa en submergir completament les bales de palla en una piscina amb calç acabada d'apagar. Així les bales es fan massisses quan s'assequen. Aquest tractament li aporta a la bala qualitats hidròfugues, ignífugues. Per altra banda, la calç crea un ambient inhòspit per a rosegadors i insectes. Encara que aquest sistema comporta moltes avantatges, al mullar la bala, aquesta augmenta considerablement el seu pes, cosa que dificulta la seva mobilitat, el seu maneig. Aquest sistema només s'ha utilitzat a l'Estat espanyol. En la resta de construccions executades, amb èxit, arreu del món no s'ha fet servir. Això vol dir que aquest tractament a les bales, no és necessari per a una correcta execució d'una obra.

El sistema de Tom Rijven[21] intenta crear tensió en totes les direccions de l'estructura creant d'aquesta manera una superfície forta i estable. El sistema consisteix en col·locar bales prèrevocades de gairó entre una estructura lleugera de fusta que, per ella mateixa, no té capacitat portant. Aquesta estructura, en combinació amb les bales, forma un fort entramat amb resistència portant. Aquest sistema té una difícil construcció.

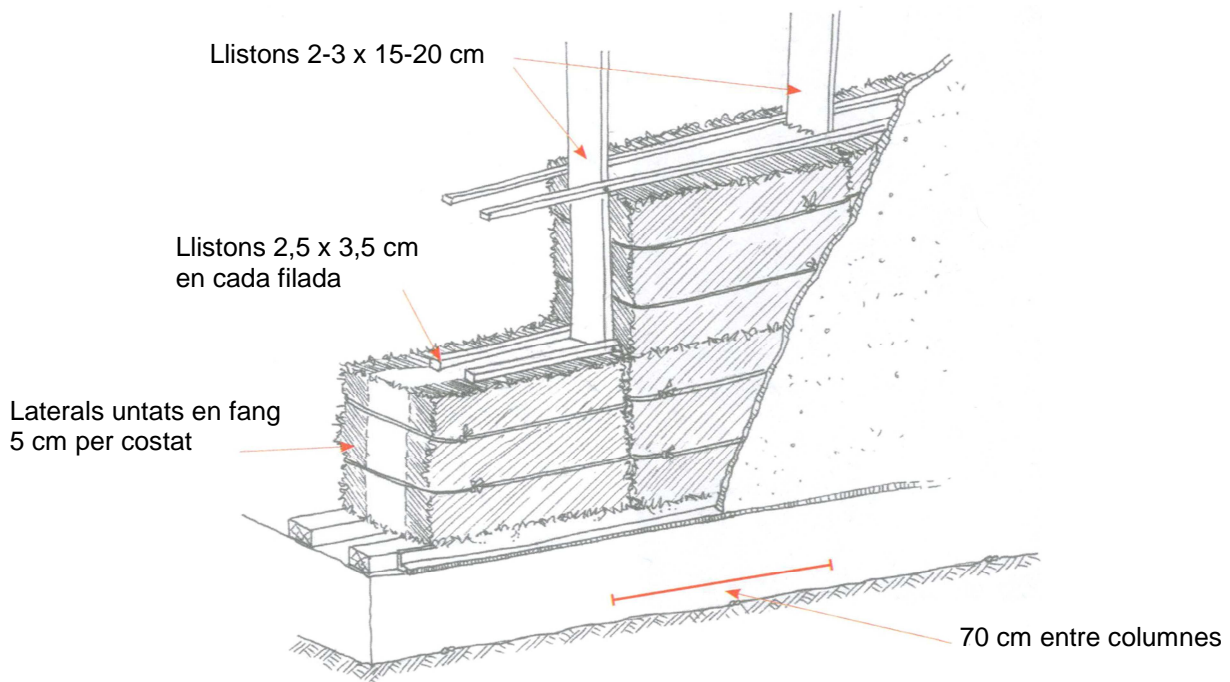


Fig.1.7: Esquema del sistema de Tom Rijven. Font: Rikki Nitzkin i Maren Tremens (2010)

El 1982, Louis Gagné va desenvolupar, al Canadà un sistema anomenat “morta-red-bale matrix System”[22]. Les bales es col·loquen com a maons amb morter de ciment, deixant juntes en creu, que formen una retícula. Aquest sistema, però, té el problema que genera molts ponts tèrmics i la palla perd la seva millor qualitat.

1.2.4.2. Pilars i bigues o no portant

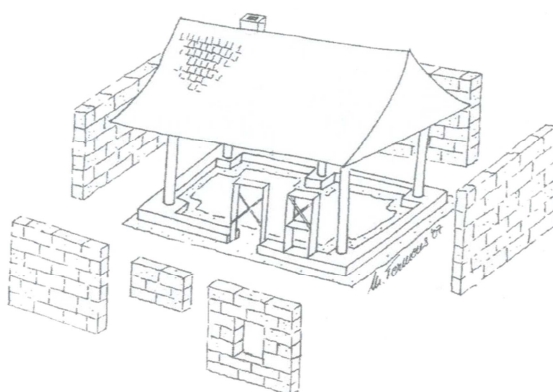


Fig.1.8: Esquema del sistema no portant. Font: Rikki Nitzkin i Maren Tremens (2010)

En aquest sistema es construeix primer un marc estructural que suporta totes les càrregues i les transmet a la fonamentació. Les bales de palla solament fan la funció de tancament i aïllant. Aquest sistema el fan servir generalment aquells amb coneixements constructius o els que dubten de la capacitat portant de la palla.

L'auto-construcció en aquest sistema és més complicada perquè, com ja hem dit, es requereixen coneixements de construcció per a la seva correcta execució. Les principals dificultats en aquest sistema es centren,

sobretot, en els ponts tèrmics i en la resolució de juntes entre l'estructura i la palla. Generalment, s'ha de contractar a professionals per a l'execució de l'estructura.

Hi ha diferents tipus d'estructura en que la palla es fa servir de tancament o farcit. Es poden fer servir pilars i bigues de fusta massissa, columnes de fusta o altres materials i es pot folrar una estructura ja existent.

Pilars i bigues de fusta

Quan es fan servir pilars de fusta, es col·loquen les bales de palla a trenca juntes al voltant de l'estructura evolvent. En aquest cas, s'ha de tenir en compte en quina posició estarà el pilar en relació a les bales de palla, com afecta aquesta posició a l'hora d'evitar ponts tèrmics i si ens genera problemes en l'arrebossat; com resoldrem el lligam de les bales a l'estructura i quin tipus de coberta ens permetrà fer.

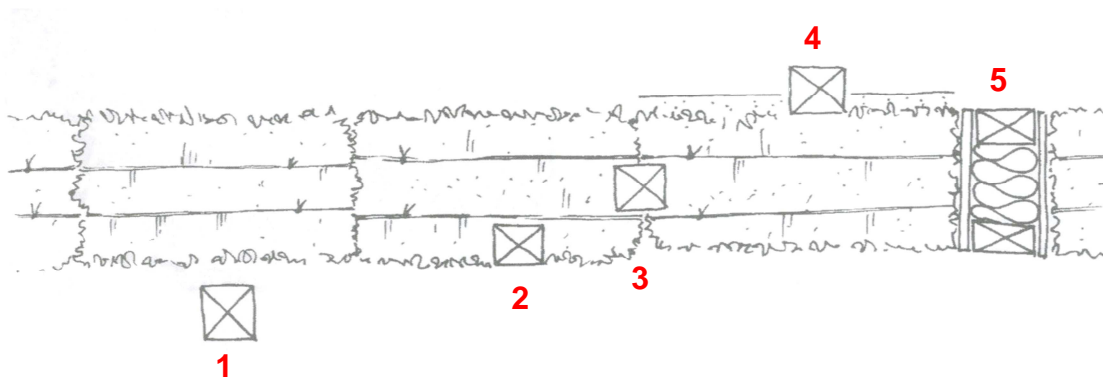


Fig.1.9 : Diferents posicions del pilar respecte al mur. Font: Rikki Nitzkin i Maren Tremens (2010)

En el cas que decidim desvincular els pilars del mur (Fig.1.9 posició 1), evitarem haver de modificar les bales per a adaptar-les al pilar, defugirem els ponts tèrmics i la resolució de l'arrebossat entre pilars i palla. En canvi, ens serà més difícil estabilitzar el mur per la falta de connexió amb l'estructura i perdrem l'espai que hi queda entre l'estructura i el mur.

Una alternativa al problema pot ser posar el pilar tocant el mur, així, ens serà més fàcil lligar el mur amb l'estructura (Fig.1.9 posició 4). Amb aquesta s'ha de tenir cura sobretot a l'hora de revocar les juntes entre fusta i palla. Seria convenient pre-revocar les bales per evitar problemes amb el foc.

També es pot enrasar el pilar al mur (Fig.1.9 posició 2), fent servir sistemes de connexió mur-estructura que ens ajudaran a estabilitzar el mur. El procés per a aixecar els murs és més lent, ja que s'ha de realitzar una osca en cada bala per a adaptar-se als pilars.

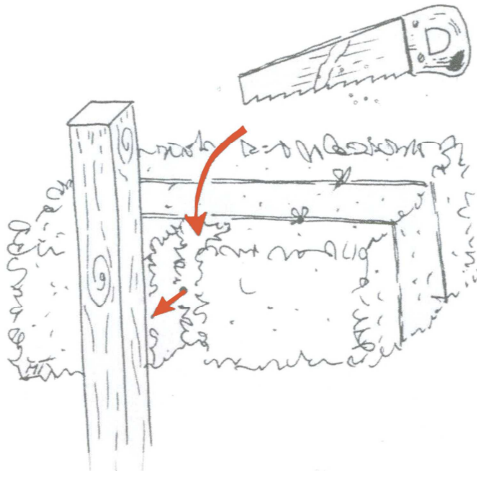


Fig.1.10: S'ha d'ajustar el pilar al mur. Font: Rikki Nitzkin i Maren Tremens (2010)

farcit d'aïllant amb el mateix ample del mur (Fig.1.9 posició 5). Aquest sistema implica una fabricació prèvia, ens dóna més feina i, a més, ens genera problemes a l'hora d'arrebossar.

Un altra opció és enquestar el pilar en el centre de les bales (Fig.1.9 posició 3). D'aquesta manera, l'estabilització del mur és més ferma i s'eviten ponts tèrmics. Per aixecar els murs s'han de fer osques en dues bales per a cada pilar, per tant, el procés per a aixecar els murs és molt lent. També existeix una limitació en quant a la mida dels pilars, que mai pot ser més gran que la separació entre cordes.

Es pot fabricar, també un caixó de fusta

1.2.4.2.1. Columnes

Aquest sistema és semblant al de Tom Rijven. En aquest cas, però, les columnes són més grans, tenen funció portant i no depenen de la palla per a tindre resistència estructural.

Hi ha dues possibilitats: es pot fer una columna amb un sol llistó de fusta o amb dos llistons.

Es col·loquen els llistons de fusta, paral·lels, formant una columna de 35-45cm d'ample si utilitzem un sol llistó i 15-20cm si fem servir dos llistons. La distància entre columnes la marca la llargada de la bala que tenim. Per sobre posem, amb cargols, un cercol perimetral.

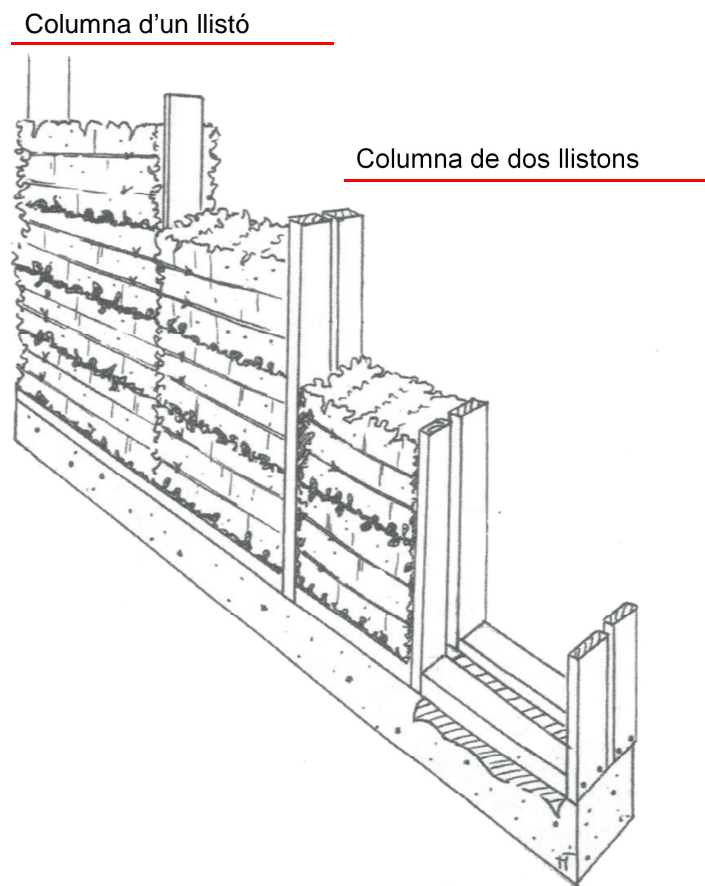


Fig.1.11: Tipologies de columnes. Font: Rikki Nitzkin i Maren Tremens (2010)

La tècnica amb dues columnes, amb un buit intermedi, ens ajuda a l'hora d'evitar ponts tèrmics. Hem de tindre en compte que aquesta opció es més difícil a l'hora de muntar que si fem una sola columna.

En les columnes d'altres materials, s'ha de tindre especial cura a l'hora d'aïllar per evitar ponts tèrmics i prevenir la humitat per capil·laritat. També s'ha d'estudiar molt bé la manera de fixar les bales per a la seva estabilització.

1.2.4.2.2. Altres sistemes: El GREB i els prefabricats

Existeixen altres sistemes constructius on la palla no fa d'element portant, com és el cas del GREB. Aquesta tècnica (que combina diverses mètodes) fou creada per Patrick Drey i Martin Simrad. Consisteix en edificar una doble estructura lleugera amb llistons de fusta de 10 x 4cm, formant un passadís on es col·loquen les bales de palla. Les superfícies verticals restants s'omplen de morter alleugerat amb serradures mitjançant un encofrat. Aquest sistema és relativament fàcil de realitzar en auto-construcció, ja que tant els llistons com l'encofrat són lleugers. A l'Estat espanyol existeix una xarxa d'aquest tipus de construcció[23]

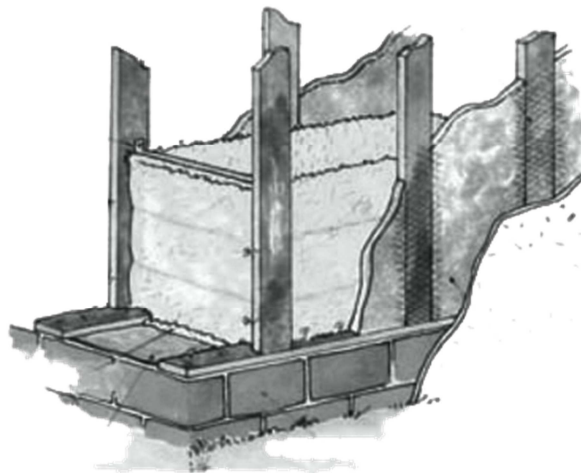


Fig.1.12: Tècnica GREB. Font: APPROCHE PAILLE.[23]

També s'han desenvolupat en els últims anys diferents sistemes de prefabricació de parets amb bales de palla. N'hi ha de dos tipus: en uns les bales de palla estan en sec i en els altres, s'aplica una capa de recobriment a les bales. Aquest sistema ens permet treballar en l'obra menys temps, encara que ja no és tan adequat per a l'autoconstucció.



Fig.1.13: Prefabricat de palla. Font: Modcell.[24]

1.2.4.2.3. Folrar una estructura

Aquest sistema és adequat per a reformes, canvis d'us i, sobretot, per a estructures que no estan pensades per a l'habitatge. El més important d'aquesta opció és assegurar-se d'amarrar les bales a l'estructura i generar, si és possible, un ràfec suficient per a protegir el mur de la pluja.

1.2.4.3. Sistemes híbrids

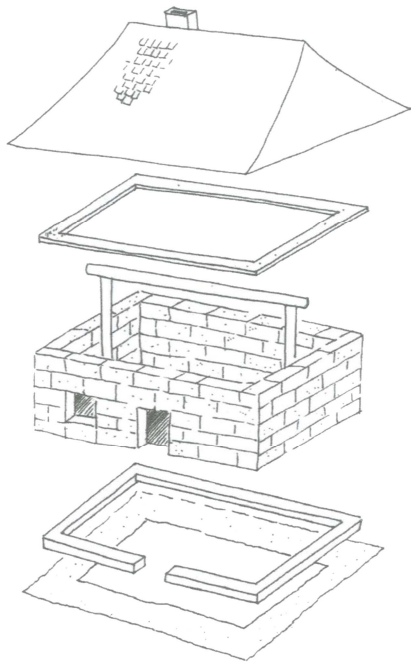


Fig.1.14: Esquema sistema híbrid. Font: Rikki Nitzkin i Maren Tremens (2010)

Aquest sistema és una combinació dels dos anteriors. Intenta reunir el millor de cadascun. Tenim moltes possibilitats: hi ha vegades que es fan servir pilars a llocs estratègics (portes, finestres...) i en la resta de la casa es col·loquen murs portants o es construeixen tots els murs portants, però el carener el suporten postes. La combinació de la construcció amb palla, amb altres materials, és positiva. Per exemple: aprofitem per a construir un mur de tapia, amb molta inèrcia, encarat al sud.

A l'hora de fer una construcció de dos pisos tenim l'opció de fer la planta inferior amb columnes i la planta pis amb murs portants; d'aquesta manera, ens assegurarem l'estabilitat del pis inferior i no haurem d'esperar a la compressió del mur per a continuar amb la construcció.

Amb qualsevol combinació que fem servir ens trobarem amb l'inconvenient de la dificultat de disseny. Haurem de tenir en compte les unions entre murs de diferents materials o haurem de compensar els assentaments dels murs, que seran diferents en murs portants i murs que no ho són. Si resollem aquests problemes, el resultat pot ser molt bo aprofitant els punts forts de la palla i evitarem les seves restriccions en el disseny.

1.2.5. Normativa

1.2.5.1. Introducció

Són pocs els països amb normativa específica sobre la construcció amb bales de palla. En la resta, ens podem trobar amb diferents possibilitats:

- Absència de normativa: es podria construir legalment el que es vulgui i on es vulgui. Generalment aquest cas es dona en països poc desenvolupats.
- Normativa que incorpori pautes generals sobre la construcció en palla: aquestes pautes poden no estar legalment adoptades, però es fan servir informalment. Molts cops aquestes pautes estan copiades d'alguna normativa existent.
- Normativa que contempli materials i mètodes alternatius: encara que no es contempli específicament bales de palla, s'ha de demostrar que la construcció compleix amb les exigències normatives (estructurals, resistència al foc...).

1.2.5.2. Normativa a nivell mundial

Actualment només hi ha quatre països amb normativa específica sobre la construcció amb bales de palla:

Estats Units (1995-1996)

Al ser el país on es va començar a construir amb bales de palla, és on hi ha més regulació normativa. Hi ha normativa a tres estats: Nou Mèxic, Arizona i el Canadà i a més de diverses ciutats.

El codi de Califòrnia "California Straw-Bale-Code" (1995) disposa d'unes pautes generals per a qualsevol sistema constructiu.

El "Annotated Prespective Building Code from Load-bearing and Non-Load bearing Straw Bale Construcction" (1996), la normativa d'Arizona, estableix estàndards mínims i normatius de seguretat per a la construcció amb bales, tant com a element estructural com de tancament.

A Nou Mèxic, la "New Mexico Non-load Bearing Baled Straw Construction Building Standards" solament accepta la construcció amb bales de palla sense funció estructural.

Bielorússia (1999-2007)

El 1999 es va establir una regulació per a la construcció amb bales de palla amb la classificació “Experimental”. El 2001 va adquirir la categoria de “Technical Condition” i l’any 2007 va arribar al màxim nivell, el “State Standard”. Aquesta normativa contempla les bales de palla com a simple material aïllant de tancament.

Alemanya (2006)

El govern alemany va aprovar al 2006 una normativa que autoritza les bales de palla solament com a material de tancament, sense funció estructural. Abans s’havien autoritzat diverses construccions, que havien presentat informes favorables del material.[25]

França (2012)

L’1 de gener del 2012 van entrar en vigor oficialment les “Règles professionnelles de la construction paille”. Un document de bones practiques en la construcció amb bales de palla. La seva redacció la va dur a terme la xarxa francesa de construcció amb palla[26]. En aquesta norma es reconeix solament la palla com a element d’aïllament i no estructural.

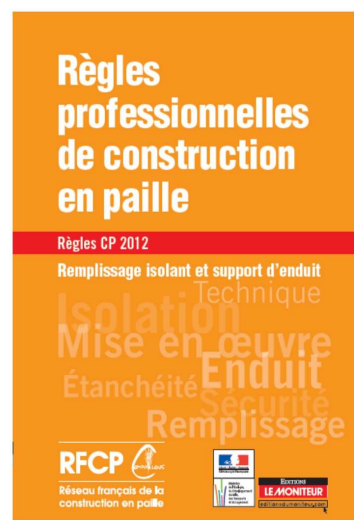


Fig.1.15: Portada “Règles professionnelles de construction en paille”[27]

1.2.5.3. La construcció amb palla a l'estat espanyol

Encara que no existeix cap normativa a l'estat espanyol que reguli la construcció amb bales de palla, la CTE no ens impedeix tampoc utilitzar-la en una obra. Per tant, és possible l'execució legal d'un habitatge realitzat amb aquest sistema constructiu. Per aconseguir-ho s'han de seguir el mateixos passos que en un habitatge convencional. La dificultat a l'hora de legalitzar una construcció en palla resideix a l'hora de demostrar que el material compleix les exigències. Arreu de l'Estat existeixen diversos habitatges unifamiliars totalment legalitzats, que posen les coses més fàcils a l'hora de legalitzar futures construccions.

1.3. PANELLS I BLOCS DE PALLA

Al 1920 es va produir a França i Suïssa plaques de palla armades amb el nom de *solomite*. A Anglaterra i Alemanya també es van desenvolupar un tipus de panell sense aglomerant, fabricades amb pressió, temperatura i recobertes de cartró. Es feien servir com a aïllament tèrmic, de revestiment o per a envans.

També apareixen uns altres tipus de panells fets amb resines a altes pressions que presenten una solidesa similar a l'OSB.

Actualment, existeix al mercat un producte en forma de panells de palla premsada amb resines sintètiques.

Aquest producte s'anomena comercialment *stramit* i es crea a

Anglaterra. En aquest sentit, el 27 d'abril de 2010 es van presentar les conclusions d'un projecte, amb l'ajuda de la Diputació de Badajoz, anomenat PROYECTO FIVECO: "Estudio y análisis para la utilización de fibras vegetales en la fabricación de materiales para la construcción"[30]. Es tracta d'un estudi al voltant de la viabilitat d'utilització de subproductes agrícoles com a material de construcció a la província de Badajoz. L'estudi es centra sobretot en els panells de palla comprimida patentats per *Stramit*.



Fig.1.17: Detall de la màquina de comprimir palla de Stramen Tech[28]



Fig.1.18: Panells de palla comprimida Stramit[29]

A França l'empresa Stramen tech també fabrica panells de palla, premsats sense aglutinats químics i folrats amb cartró reciclat.



Fig.1.19: Bloc Orizaltech[31]

El 2001 es va desenvolupar a Califòrnia un sistema de blocs de palla súper comprimits amb aglutinant, anomenats *Oryzatech*.

Al ser productes industrialitzats, tots aquets productes compten amb multitud de certificats que avalen el seu bon funcionament en quant a resistència al foc i aïllament acústic i tèrmic.

En general aquest tipus de panells es fan servir per a falsos sostres i per a particions interiors, com a un bon substitut del cartró guix.

1.4. ARREBOSSATS

Un dels acabats més utilitzats en la construcció en bales de palla és l'arrebossat de terra. L'arrebossat ens proporciona la massa tèrmica que li falta a la palla, ens dona resistència al foc i, a més, ens protegeix de les humitats, els insectes i els rosegadors.

En aquest tipus d'arrebossat tenim quatre capes bàsiques:

1. **La imprimació:** com a primera capa afegirem una beurada d'argila o calç, per afavorir l'adherència de les capes successives.
2. **La capa de penetració:** la funció d'aquesta capa és garantir la unió entre el mur i l'arrebossat (capa base). Hem d'assegurar-nos que l'arrebossat s'introdueix el màxim possible dins la palla. Aquesta capa es pot fer projectant-la amb una màquina.
3. **La capa base:** aquesta capa és la més important. Ens determinarà l'aspecte del mur i ens protegirà el mateix. La capa tindrà com a mínim 2 centímetres de gruix.
4. **La capa d'acabat:** acabat estètic del mur.

En la capa base s'afegeix fibra vegetal, normalment palla, que ens crea un teixit tridimensional de reforç. Si la palla que es fa servir té una llargària de 5 a 10cm ens dona flexibilitat a la mescla i podem treballar-la sense que es trenqui. Quan l'arrebossat es seca, les fibres de la palla assumeixen les retraccions i ens eviten esquerdes. Finalment, la palla està protegida pel mateix arrebossat.

A més dels arrebossats de terra hi ha altres tipus d'arrebossats amb calç, argila i additius naturals per a reforçar la massa. Tots aquests, en la seva capa base, comptaran sempre amb la presència de fibres vegetals. La més comú, la palla.

Aquests arrebossats no solament es fan servir en construccions amb bales de palla sinó també amb altres tipus de construccions tradicionals.

1.5. TERRA AMB PALLA

La construcció amb bales de palla és relativament nova, però la palla combinada amb fang s'ha fet servir durant milers d'anys. En l'actualitat també s'utilitzen, hi ha infinitat de tècniques i, tant en la fabricació de peces de tova com en la construcció amb cob, la fibra vegetal està present. En els dos casos la palla ens aporta resistència a tracció, evita les deformacions i absorbeix les possibles retraccions que puguin aparèixer.



Fig.1.20: Fabricació de maons de tova



Fig.1.21: Construcció de COB

CAPÍTOL 2: ASPECTES TÈCNICS

2.1 INTRODUCCIÓ

Gran part dels materials per a la construcció que incorporen palla van units al concepte de construcció *Low tech*, que pretén la recuperació de tècniques constructives tradicionals amb la mínima tecnologia. Aquesta recuperació de les tècniques tradicionals va acompanyada del coneixements actuals dels aspectes tècnics del material mitjançant assajos i certificacions.

Hi ha una gran quantitat d'assajos que analitzen les característiques tècniques dels materials que incorporen palla. Depenent del material que analitzarem en aquest apartat, veurem que hi ha més o menys quantitat d'assajos. Tot i així, però, que encara queda molta feina per fer.

2.2. BALES DE PALLA

La investigació amb bales de palla va començar l'any 1993, quan es va fer la primera conferència de construcció de bales de palla a Nebraska. Fruit d'aquesta conferència va néixer la National Straw Bale Research Advisory Network. Aquest organisme es creà amb l'objectiu de reunir experiències, assajos i investigacions sobre la construcció en bales de palla i fer-ne difusió[32].

Des d'aleshores existeixen nombroses associacions arreu del món que es dediquen a investigar el material en totes les seves vessants.

2.2.1. Aspectes estructurals

Malgrat la realització de nombrosos assajos a nivell mundial al voltant de la resistència a compressió de la bala de palla, no s'ha arribat a unes conclusions clares. L'existència de múltiples variables que afecten als resultats (humitat, densitat, recobriments...) dificulta aquesta tasca.

Encara així, sí que s'està d'acord en alguns aspectes: la bala de palla plana té més resistència a compressió que la de gairó. El gruix del recobriments té molta influència en la resistència de la bala i el cercle de coronació (que distribueix de manera uniforme i centrada la càrrega) ajuda a millorar comportament del mur.

Encara que no es pugui arribar a cap conclusió clara, podem agafar com a referència normatives existents, com la normativa californiana "Strawbale Code", que ens permet una càrrega vertical de 1953kg/m².

També alguns constructors experimentats, com l'arquitecte Gernot Mike (Building with Straw: Design and Technology of a Sustainable Architecture), assegura que un mur de bales de palla pot suportar fins 500kg per metre lineal (1000kg/m²)

Una cosa molt important que s'ha de tenir en compte estructuralment és la compressió del mur una vegada entra en càrrega. Unes bales amb la densitat òptima (110kg/m²) i una compressió prèvia del mur, ens pot millorar molt l'estabilitat i la resistència a compressió del mur.

Assajos de compressió d'una bala de palla.

Actualment encara no està clara la relació que hi ha entre la resistència d'una bala de palla i la d'un mur de bales de palla, ja que hi ha molts factors que poden afectar a la resistència del mur. El cost més elevat de l'assaig a compressió d'un mur de bales de palla fa que hi hagi molts més assajos a compressió amb una bala de palla.

Hi ha molts factors que condicionen la resistència a compressió d'una bala de palla, com la densitat de les bales que depèn, en gran mesura, de l'embaladora.

L'any 2006 l'*Asian Research Publishing Network*[33] va publicar un estudi sobre la resistència a compressió de bales de palla d'arròs sense arrebossat. Va dividir les bales de palla en tres grups, segons el tipus d'embaladora amb les que s'havien fet.



Fig.2.1: Premsa hidràulica [33]

Les bales del grup 1 presentaven dimensions irregulars i una baixa densitat (per sota dels 90kg/m^2). La seva deformació màxima amb 50 tones de càrrega va ser de 25cm. La deformació de les bales del grup 2, que van ser sotmeses a dos cicles de càrrega, i va arribar a deformar fins als 20cm amb 50 tones de càrrega. En el grup 3 la deformació va ser de 3cm.

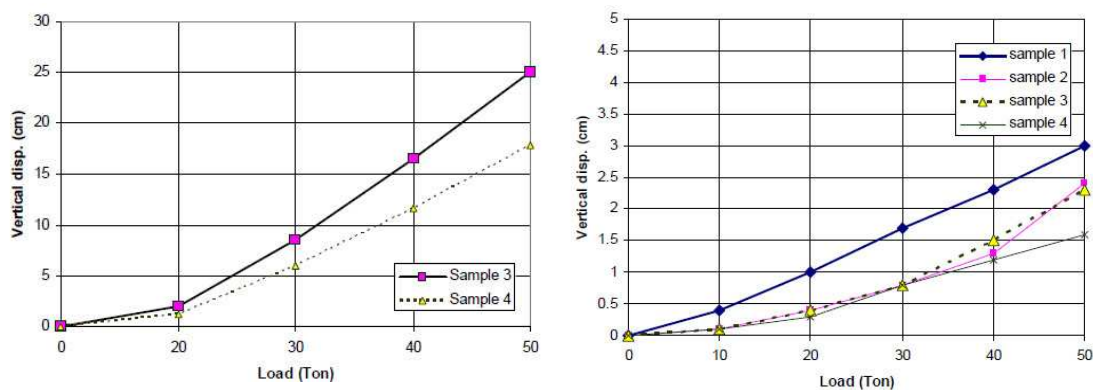


Fig.2.2: Resultats de l'assaig del grup 2 i del grup 3. [33]

Van arribar a la conclusió que l'embaladora del grup 1 no és bona per a la fabricació de bales en construcció. L'embaladora del grup 2, encara que tenia la densitat recomanable, les seves formes exteriors irregulars van fer que no la consideressin bona per a construcció. L'embaladora del grup 3 va ser l'única que va donar bons resultats, segons l'estudi, per a la producció de bales per a construcció.

Un altre factor que condiciona la resistència de les bales de palla és la seva disposició (gitades o de gairó). En aquest sentit Stephen Vardy i Colin MacDougall[34] van realitzar assajos comparatius per a investigar l'efecte de l'orientació en la resistència de les bales de palla amb arrebossat.

El primer que es va fer, i per evitar la disparitat de resultats, va ser la creació d'una plantilla perquè totes les bales fóren iguals. Es va aplicar un recobriment amb diferents gruixos



Fig.2.3: Procés d'igualació de les bales. [34]

L'assaig es va realitzar en un total de 30 bales de palla amb recobriment i cada tipus de mostra es va assajar tres cops. També es va assajar unes mostres sense recobriment.



Fig.2.4: Trencament del recobriment en la bala plana i la bala de gairó. [34]

Els resultats dels experiment realitzats van treure a la llum diferents aspectes que afecten a les propietats estructurals de les bales de palla:

- La resistència de la bala de palla depèn, en gran mesura, de l'orientació de la bala. Les bales col·locades planes tenen més resistència que les de gairó.
- Les bales planes i les de gairó trenquen diferent, les col·locades de gairó fallen per vinclament del recobrint, mentre que en les bales planes, es trenca en les zones d'aplicació de la càrrega.
- L'espessor del recobrint té una gran influència a la resistència de la bala. S'aconsegueix major resistència augmentant el doble la quantitat de recobrint, que el doble la resistència del recobrint.

Assajos de compressió de murs

Un bon exemple d'assaig de resistència és el que es va realitzar l'any 2002, a Austràlia de dos mostres de murs de palla amb diferents recobriments[35]. En un es va realitzar un recobriment de morter de cal i en l'altre un d'argila.

Per a imitar el millor possible el procés de construcció d'un mur de bales de palla es va procedir a carregar el mur en diferents fases. En la fase numero 1 s'aplica una càrrega "A" al mur abans d'executar el recobriment. En la fase 2, amb el recobriment, s'aplica una força "B" igual o inferior a "A". En la fase 3 s'augmenta la força B fins el trencament.

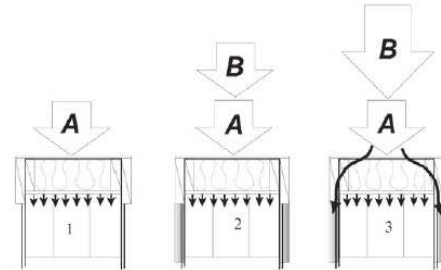


Fig.2.5: Fases de càrrega [35]



Fig.2.6 : Durant l'assaig [35]

Els resultats van mostrar com el recobriment amb millor resistència és el morter de cal.

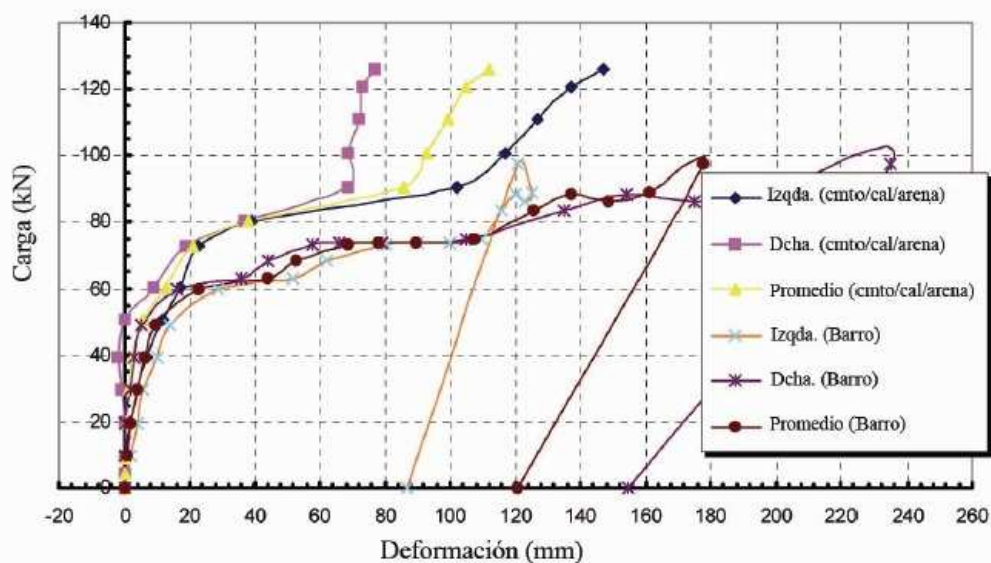


Fig.2.7: Resultats de l'assaig[35]

2.2.2. Resistència al foc (EI)

La resistència al foc és el temps en minuts en que un element constructiu exposat al foc manté la seva estabilitat i les seves característiques estructurals i d'aïllament. Tot això sense deixar passar la calor perquè puguin incendiar-se els materials situats a l'altra part del mur.

La resistència al foc de les bales de palla és deguda a l'estanqueïtat. La compressió de les bales i l'arrebossat impedeix que l'oxigen que hi ha en les bales de palla circuli. Encara que es produeixi una esquerda en el recobriment i la bala comença a cremar, aquesta genera una capa carbonitzada que impedeix l'entrada de l'oxigen.

Hi ha molts assajos de resistència al foc que ho demostren. A continuació, dos exemples.

L'any 2006 es va realitzar un assaig de resistència al foc de dos parets diferents de palla amb recobriments diferents[36]. A la mostra 1 es va aplicar un recobriment d'argila de 25mm a cada costat. A la mostra 2 un recobriment de morter de cal.

Es portava la mostra a un cremador, en una hora s'arribava als 900°C i es mantenia.

En la mostra 1 les esquerdes van començar a aparèixer als 25 minuts. Al cap de 60 minuts el foc no havia arribat a la cara oposada. A més, l'espessor del material cremat en la cara exposada no superava els 10 cm.

La mostra 2 es va començar a esquerdar als 20 minuts. A les 2 hores la cara oposada no presentava esquerdes.



Fig.2.8: Retirada de la mostra del forn [36]

L'any 2008 es va encarregar per a l'edifici d'iniciatives ciutadanes de l'Expo Zaragoza un assaig de resistència al foc segons UNE-EN 1364-1:2000 d'un mur de palla no portant[37].

La mostra era un mòdul de bales de palla recobertes amb argila i arena de 2200x1200mm. La temperatura al forn va arribar als 1000°C i va aguantar els 90 minuts necessaris.

2.2.3.Comportament tèrmic

2.2.3.1. Conductivitat tèrmica

El coeficient de conductivitat tèrmica és la capacitat d'un material a conduir la calor, és a dir, la facilitat amb que la calor passa per un material. Tècnicament és la quantitat de calor que passa per unitat de temps a través d'una secció de material. La conductivitat tèrmica s'expressa en el sistema internacional, en W/mK. Un edifici eficient energèticament tindrà un coeficient de baixa conductivitat tèrmica.

La conductivitat tèrmica de la palla depèn, sobretot, de la densitat de la bala (compressió a la que està sotmesa la palla) i a la humitat de la palla.

Encara que sembli estrany, segons assajos realitzats per diferents laboratoris[38], s'ha comprovat que les bales col·locades de gairó tenen un aïllament tèrmic superior a les col·locades planes. Aquest fenomen és degut a l'orientació de les fibres. En les bales de palla col·locades de gairó, les càmeres d'aire formades pels tubs de la palla no tenen contacte directe amb l'entorn, mentre que en les col·locades planes, sí.

Segons assajos realitzats en diferents països[39], es considera que la bala de palla amb una densitat 100 Kg/m² té un coeficient de conductivitat tèrmica de 0,045 W/m K. Si comparem aquest coeficient amb altres materials de construcció, ens adonem que la bala de palla és un bon aïllant tèrmic.

Material	W/m.K
Aire	0,02
Fibra de Vidrio	0,03 - 0,07
Corcho	0,04 - 0,30
Paja	0,045
Madera	0,13
Agua	0,58
Ladrillo	0,80
Acero	47,00 - 58,00
Aluminio	209,30

Fig.2.9: Font: Rikki Nitzkin i Maren Tremens

2.2.3.2. Inèrcia tèrmica

La inèrcia tèrmica és la propietat que indica la quantitat de calor que pot conservar un material i la velocitat amb que el cedeix o absorbeix de l'entorn. La inèrcia depèn de la massa, del calor específic i del coeficient de conductivitat tèrmica.

Encara que, a l'hora de construir la lleugeresa de la bala de palla ens resulta útil, aquesta falta de massa ens disminueix la capacitat d'emmagatzematge de la calor. Aquesta carència de la palla la compensarem amb altres elements amb un elevat per propi com un arrebossat interior dels murs d'uns 3 a 6 cm i d'uns sòls de ceràmica massissa o de fang. Quan encendrem una font de calor, l'arrebossat i els sòls absorbiran la calor i després la soltaran progressivament.

2.2.4. Comportament higròtermic

La humitat és un dels principals inconvenients a l'hora de construir amb bales de palla, per tant, s'ha de conèixer i prevenir.

Hi ha cinc possibles orígens d'humitat en un tancament de bales de palla:

1. Humitat per capil·laritat: aquesta humitat és produïda per la hidrofília dels materials de construcció. Aquests actuen com un cos esponjós degut a la humitat present en el sòl. És necessari, per tant, protegir-se d'aquest tipus d'humitat mitjançant una barrera (física o química) que ens la eviti.
2. Humitat per condensació: aquesta humitat es produïx quan el vapor d'aigua interior generat per l'activitat dels ocupants topa amb una paret freda. Aquest vapor passarà de gas a líquid ràpidament. D'humitats per condensació n'hi ha de dos tipus: condensació superficial, que provoca taques d'humitat a les parets i la condensació intersticial, la més perillosa i que es produïx a l'interior del mur.
3. Humitat per pluja: l'aigua de pluja és, en general, la principal font d'humitat existent en una construcció, per tant, s'ha de controlar. Una sobre cimentació i uns alerons de més de 50cm en la coberta solen ser suficients.
4. Humitat accidental: produïda pel trencament d'alguna canonada. Aquesta font d'aigua s'ha d'arreglar immediatament i s'han de substituir les bales del mur afectades.
5. Humitat incorporada durant la construcció: molts materials de construcció tenen alts percentatges d'humitat. Per exemple: els morters i els arrebossats de terra argilosa tenen un elevat contingut en aigua. Per tant, s'han de deixar assecar abans de tancar per complet la construcció.

Una sèrie d'assajos realitzats durant l'any 2003 van arribar a les següents conclusions[40]:

La humitat de les bales de palla ha de ser inferior al 25% del pes sec per evitar el creixement de microorganismes.

Si les bales tenen més del 25% d'humitat en algun moment s'ha d'evitar l'ús d'aquestes bales, ja que contindran microorganismes latents.

El contingut d'humitat indica una situació apta per a la descomposició, però una elevada temperatura és un indicatiu clar de descomposició.

2.2.5. Comportament acústic

2.2.5.1. Aïllament acústic

L'aïllament acústic té com a objectiu protegir un determinat espai de les penetracions de sons exteriors i evitar-ne la seua eixida.

Hi ha diversos factors que ens afecten a l'hora d'aconseguir un bon aïllament acústic. El principal és la massa: a major pes, major aïllament acústic. També quan es tracta d'un tancament amb diverses capes, una correcta disposició d'aquestes ens pot donar com a resultat un bon aïllament acústic. Aquesta disposició consisteix en una estructura tipus *sandwich*, format per dos membranes amb massa (arrebossat interior i exterior) i un nucli amb un material porós (com la palla).

L'aïllament acústic (R), es va mesurar en una paret amb bales de palla amb un recobriment de morter i 51cm de gruix total[41]. El resultat per aquesta prova va ser $R=59,8$ dBA. Aquest valor pot ser equiparable a un mur de formigó armat de 24cm de gruix ($R=60$ dBA).

L'any 2003, Jasper Van der Linden, va assajar una paret amb recobriment argilós segons la norma ISO 140-3 per comprovar el nivell d'atenuació acústica. El nivell d'atenuació acústica ve ser de 53 dBA[42].

2.2.5.2. Absorció acústica

L'absorció acústica és un fenomen que afecta a la propagació del so. Quan una ona sonora arriba a una superfície, una part de l'energia es reflexa, mentre un altra part és absorbida. La capacitat d'absorció d'un material és la relació entre l'energia absorbida pel material i l'energia reflectida pel mateix.

L'eficàcia de les bales de palla per absorbir el so es va mesurar en una habitació cubica de parets de maons[43]. Es va mesurar el temps de reverberació de l'habitació abans i després d'incorporar 10 bales de palla. La quantitat de so absorbit augmentava i el temps de reverberació disminuïa amb la incorporació de la palla.

2.2.6. Resistència als sismes

Existeixen estudis al voltant d'assajos realitzats en parets de bales de palla amb recobriments reforçats amb malles metàl·liques o plàstiques.

Arran del terratrèmol que va assolar Pakistan l'octubre del 2005 i va produir més de 100.000 morts, es va crear la Pakistan Straw Bale and Appropriate Building PAKSBAB. Aquesta associació va desenvolupar la construcció d'un habitatge assequible per a tothom, eficient energèticament i resistent als sismes.

El març de 2009, van dur a terme un assaig de resistència sísmica d'una casa de palla[44]. La casa va ser sotmesa a una sèrie de 8 terratrèmols d'intensitat creixent. La prova es va fer a les instal·lacions de simulació d'Enginyeria Sísmica de La universitat de Nevada.

La construcció, encara que greument danyada, no tenia risc de col·lapse, inclús al final de la seqüència de la prova.

2.3. PANELLS, BLOCS I MURS PREFABRICATS DE PALLA

Els sistemes de construcció amb panells, blocs i murs prefabricats de palla són productes industrialitzats, cada tipus diferent de material compta amb quadres de característiques o certificacions, obtingudes mitjançant assajos. Aquestes certificacions es poden consultar, en la majoria de casos, mitjançant la web comercial del producte.

2.4. TERRA AMB PALLA

Com no hi ha normativa específica per a la construcció amb terra i, les característiques del material varien segons el tipus de terra i la dosificació, a l'hora de construir amb aquets materials es tenen que fer assajos per a demostrar el bon funcionament del mateix.

Per exemple, en una construcció de COB que s'està realitzant al municipi de La Pera es van portar provetes a un laboratori per comprovar la resistència a compressió i a flexo tracció segons normativa. Els resultats de l'assaig van donar una resistència a compressió de $1,8 \text{ N/mm}^2$ i una resistència a la flexotracció de $0,7 \text{ N/mm}^2$.

2.4.1. Resistència als sismes

En zones amb un risc alt de sismes i amb tradició de construcció amb terra, s'estan realitzant una sèrie d'assajos per conèixer i millorar la resistència als sismes d'aquests tipus de construcció. La Universidad Catolica del Perú va realitzar un assaig de simulació sísmica[45]. En aquest assaig es va reproduir, mitjançant un simulador, un sisme que va tindre lloc al Perú als anys '70. Encara que el mur no va col·lapsar, es va arribar a la conclusió que, de ser un cas real, s'hauria de tombar i reconstruir totalment l'edificació.

CAPÍTOL 3: CAMPANYA EXPERIMENTAL

3.1 INTRODUCCIÓ

En aquest capítol es mostren tots els processos necessaris per a la realització dels assajos i el seu posterior anàlisi. En primer lloc, s'expliquen els materials utilitzats per a la fabricació de les provetes i, després, s'explica el mètode de fabricació de les mateixes.

Una vegada fabricades les provetes s'explica la metodologia seguida per a la realització dels assajos i s'analitzen els resultats obtinguts.

3.2. PROCES DE PREPARACIÓ DE LES PROVETES

3.2.1. Introducció

En aquest apartat s'expliquen tots els detalls del procés de fabricació de les provetes. Primerament s'expliquen les principals característiques dels diferents materials utilitzats per a la fabricació de les mostres. Seguidament, es caracteritza el tipus de provetes i, finalment, s'explica com s'ha dut a terme el procés de fabricació.

3.2.2. Materials utilitzats

3.2.2.1. Guix

Quan parlem de guix ens podem referir a diferents materials o productes.

Ens acostem a una pedra natural composta per sulfat de calci cristal·litzada amb dues molècules d'aigua per cada molècula de sulfat de calci. Aquesta pedra s'anomena *aljez* o *mineral de guix*. Aquest mineral és abundant en la naturalesa i a l'estat espanyol és molt abundant en la mitat oriental de la Península[46].

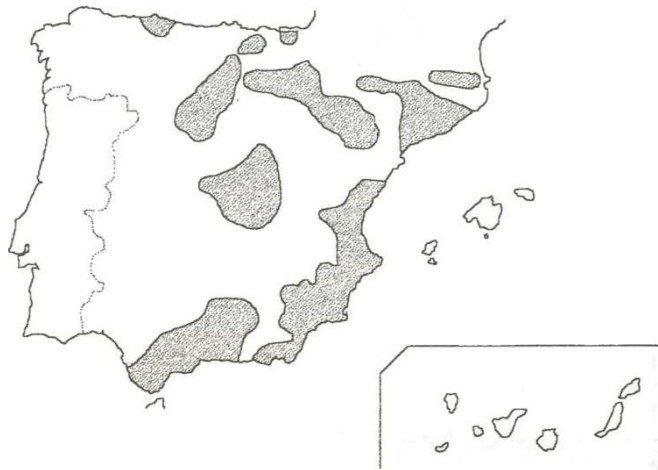


Fig. 3.1: Presència del mineral del guix a l'estat espanyol. Font: DOMINGUEZ, Luis de Villanueva i GARCIA Alfonso (2001)

També s'anomena guix al producte en pols obtingut per calcinació i molta de la pedra. La calcinació del mineral del guix es realitzava tradicionalment en forns de volta. En l'actualitat aquests processos ja s'han industrialitzat.

Quan mesquem el guix en pols amb aigua obtenim pasta de guix. Quan la pasta de guix endureix el producte resultant torna a ser guix i, encara que té la mateixa composició química, l'estructura física és més porosa.

El guix s'ha fet servir tradicionalment, en la construcció, per a diferents usos: morter de junt, per a la fabricació de panells com a particions interiors, en la volta catalana, en revestiments i com a element decoratiu.

El guix que es fa servir en la construcció ve donat en pols i, segons la norma RY-85, podem donar la classificació en cinc tipus següent:

- Guix gruixut de construcció, YG.
- Guix fi de construcció, YF. Amb una granulometria inferior al YG.
- Guix de prefabricats, YP. Guix amb major puresa que el YG i el YF.
- Escaiola, E-30. Amb una resistència a flexo tracció mínima de 30 kp/cm^2
- Escaiola especial, E-35. Amb una resistència a flexo tracció mínima de 35 kp/cm^2

El tipus de guix utilitzat com a lligam ha sigut l'escaiola E-35.

3.2.2.2. Calç

Es considera cal a qualsevol producte procedent de la calcinació de pedres calcàries. Durant el procés de calcinació el carbonat càlcic (CaCO_3) present en la pedra es transforma en òxid de calci o calç viva (CaO). Per a la utilització de la calç en construcció, després del procés de calcinació, és necessari hidratar la calç viva. Durant el procés químic, l'aigua transforma la calç viva en pols o pasta segons la quantitat d'aigua afegida (Ca(OH)_2). Una vegada posat en obra, la calç apagada es torna a carbonatar i torna a la composició química original.

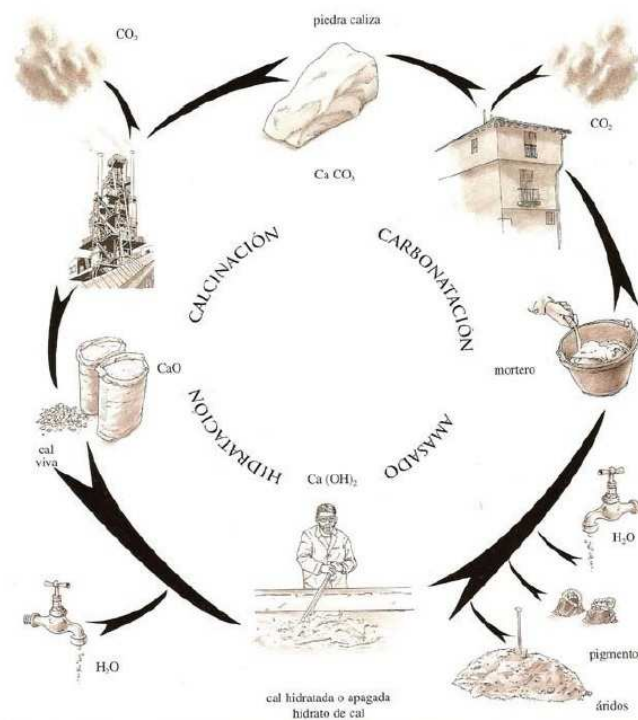


Fig. 3.2: Cicle de la calç. Font: CARRO, Francisco Javier (2007)

Encara que, col·loquialment, s'utilitza la paraula *calç* de forma genèrica, existeixen diferents tipus de calç segons la norma [47]:

La primera classificació dels tipus de cal es fa segons la seva manera d'endurir-se. Les calç que s'adormen (s'endureixen) mitjançant carbonatació i, per tant han d'estar exposades a l'aire per endurir, són les calç aèries.

Aquest tipus de calç es pot dividir en dues, segons el contingut de carbonat de magnesi: si és inferior al 5% es denomina calç càlcica i, si és superior (fins al 30%), calç dolomítica.

Les calç càlciques es comercialitzen com a calç viva o com a calç apagada, mentre que les calç dolomítiques, que presenten major dificultat d'hidratació, es comercialitzen apagades o semiapagades.

Per altra banda, es diferencien les calç hidràuliques en: calç hidràuliques naturals o calç hidràuliques artificials.

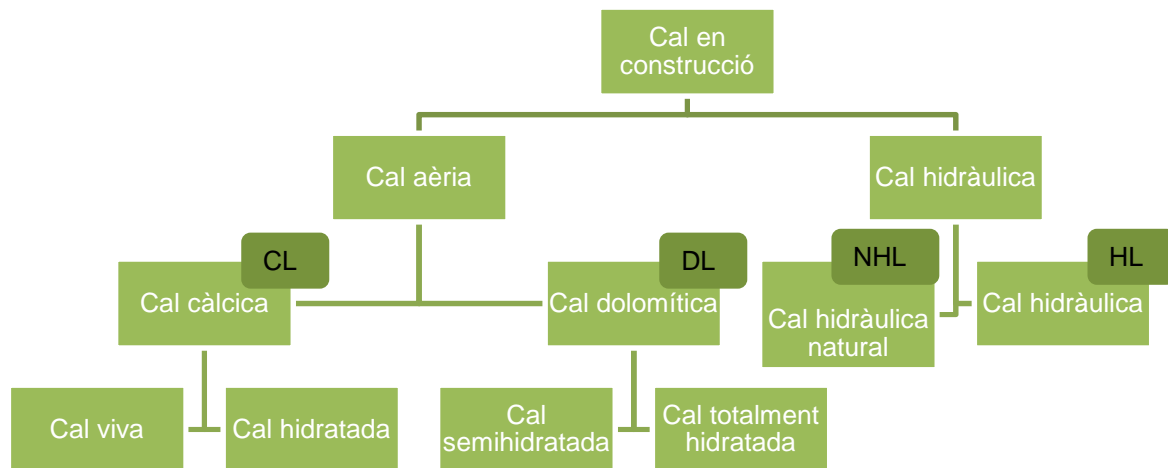


Fig. 3.3: Tipus de calç en construcció. [48]

Passem ara a veure la descripció de la calç emprada als assajos. La calç utilitzada en els assajos ha estat calç de la cantera de Saint Astier (França) del tipus NHL 3,5 segons normativa EN 459-1:2001. La composició d'aquesta calç és la següent:

COMPOSICIÓ	SAINT ASTIER
PORTLANDITA - Ca(OH)_2	33,3
CALCÀRIA - CaCO_3	26,67
ALITA - C3S	1
BELITA - C2S	30
ALUMINATS - C3A	0,33
CELITA - C4FA	0,33
GUIX - CaSO_4	
SÍLICE REACTIVA - SiO_2	6,67
ALTRES ELEMENTS	1,7
TOTAL	100

Fig. 3.4: Composició de la calç de Saint ASTIER. Font: PEÑARANDA, Pilar (2012)

3.2.2.3. Terra

La terra és producte de l'erosió de les roques de l'escorça terrestre. La composició i varietat de les proporcions de la terra depenen del lloc on es troben. La terra és una mescla d'argila, llims i arena que, depenent del grossor, s'anomena sorra, grava o pedra.

Aquets tres elements es poden diferenciar per la seua granulometria. Les partícules amb un diàmetre inferior a 0,002 mm es denominen argila; entre el 0,002 i el 0,06, llim i si està entre 0,006 i 2 mm s'anomena arena. Les partícules més grans es denominen graves o pedres.

L'argila actua com a aglomerant, aplega les partícules de llims i arenes. Els minerals argilosos tenen, normalment, una estructura laminar. Gràcies a la tensió superficial, aquestes lamines tenen una alta cohesió.

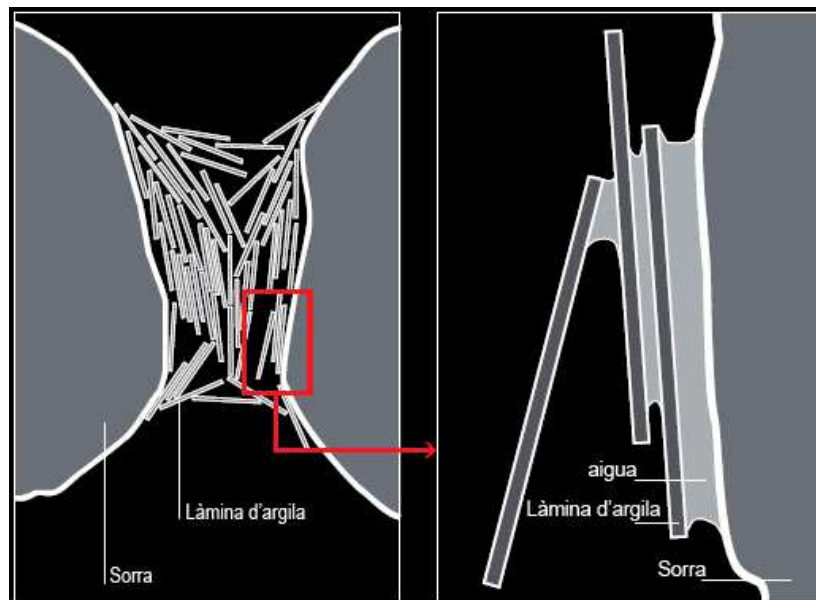


Fig. 3.5: Detall de l'adherència de l'argila .Font: etceTERRA (2012)

Les propietats del llim i l'arena són diferents a les de l'argila. Aquets són solament agregats, sense força aglutinant i fan d'esquelet de la terra.

Depenent de quin element predomina en la terra, podem parlar d'una terra argilosa, llimosa o arenosa. La proporció dels components es representa normalment amb un gràfic com el de la figura 3.6 corresponent a la granulometria de la terra utilitzada en els assajos. L'eix vertical representa el pes en percentatges del total de cada diàmetre, aquest representat a l'eix horitzontal. La corba resultant és acumulativa i es compara amb la corba de fuller.

La terra utilitzada per a la realització de les provetes prové d'un solar en obres que hi ha al costat de la Facultat de Belles Arts, a l'encreuament de l'Avinguda Doctor Marañon i el Carrer de Pau Gargalló, Barcelona. La terra s'ha guardat en un recipient tancar per evitar pèrdues d'humitat. Per a la caracterització de la terra s'ha fet un estudi granulomètric.

En la nostra gràfica podem veure com tenim una terra arenosa amb solament un 16,4% que passen pel tamís de 0,063 mm i que es podrien considerar llims o argiles. Tenim un 70,4% d'arena i un 13,2% de grava.

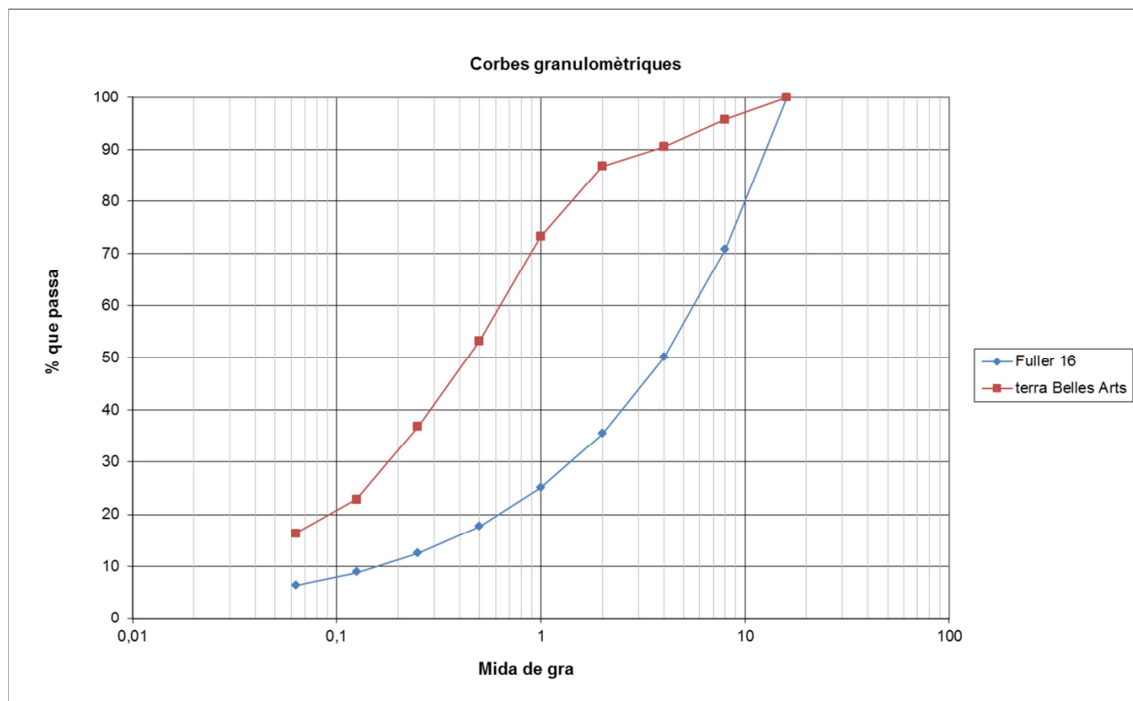


Fig. 3.6: Gràfic granulomètric de la terra utilitzada en la fabricació de provetes.

En el nostre cas i, encara que sabem que no hi ha suficient argila, es va decidir no afegir-ne a la terra, ja que les provetes no presentaven esquerdes i la seua duresa i cohesió es va considerar suficients.

Per evitar la presència de grava en la proveta, la terra s'ha passat per un tamís amb una obertura de 5mm.

3.2.2.4. La palla

La palla utilitzada per a afegir als diferents lligams s'ha extret d'una bala que va ser adquirida a la cooperativa agrícola de Benicarló (Castelló) i, segons el venedor, és d'un camp de blat lleidatà.

A l'hora d'afegir la palla a les provetes es va veure que les fibres eren massa grans, per la qual cosa es va decidir triturar i controlar, mitjançant tamisos, la llargada de la palla utilitzada per a elaborar les provetes. La palla utilitzada havia de passar per un tamís de 12,5mm d'obertura. Tota la palla que passés per un tamís amb una obertura de 2mm, quedava descartada.



Fig. 3.7 : Procés de triturat i tamisat de la palla.

3.2.3. Tipus de provetes

Segons el tipus d'assaig s'han realitzat dos tipus diferents de provetes.

Per determinar les capacitats mecàniques s'han elaborat 72 provetes assajades a flexo-tracció i a compressió; per determinar la conductivitat i la resistència al foc s'han elaborat 36 provetes quadrades.

Plaques quadrades

S'han fabricat plaques quadrades de 40x40x20mm destinades a ser assajades amb el conductímetre i a la resistència al foc. S'han realitzat provetes de cada lligam amb un contingut de palla del 0, 1, 5 i 10% i de cada tipus de proveta s'han fabricat tres mostres.

Provetes prismàtiques

S'han fabricat provetes prismàtiques de 40x40x160mm destinades a ser assajades a flexo tracció i a compressió. S'han realitzat provetes de cada lligam amb un contingut de palla del 0, 1, 5 i 10% i de cada tipus de proveta s'han fabricat sis mostres.

3.2.4. Fabricació de les provetes

Totes les mostres que s'han fabricat han estat nombrades per al seu millor control i han estat elaborades utilitzant la mateixa metodologia en cada tipus de lligam. El quadre de la nomenclatura de les provetes es troba en l'annex I.

Dosificació

A l'hora de dosificar les diferents amassades es va decidir fer la dosificació en pes i no en volum, ja que el volum de la palla és difícil de controlar. Es va utilitzar una bàscula amb una precisió de 0,01g per a pesar els components de la mostra. Segons el tipus de lligam utilitzat, la dosificació de l'amassada canvia. El tant per cent de palla de la mostra ve donat pel pes del lligam.



Fig. 3.8: Diferents exemples de pesada.

Pastat

Quant ja tenim els diferents components de la mescla pesats, els barregem en sec amb l'ajuda d'una espàtula metàl·lica i li afegim aigua fins aconseguir una mescla homogènia. Una vegada ben barrejat afegim més aigua i tornem a mesclar fins aconseguir novament una barreja homogènia.

Emmotllament

Per omplir els motlles de les provetes ens ajudarem també de l'espàtula metàl·lica per enrasar molt bé el material i així aconseguir que les mesures de totes les mostres siguin les mateixes.

3.2.4.1. Carbonatació de les mostres de calç

En el cas de les provetes realitzades amb calç, i al no tindre suficient temps per a poder esperar a que carbonaten de forma natural, es va procedir a utilitzar la cambra de carbonatació. Com no cabien totes les mostres dins la cambra, la carbonatació es va fer en dues tongades.

Les provetes van estar quinze dies a la cambra amb una concentració del 10% de CO_2 i una humitat del 50%. A l'acabar els quinze dies es va comprovar, mitjançant una proveta de control i fenoftaleïna, si s'havia carbonatat la mostra. El resultat va ser positiu. Com la carbonatació es va produir, es va procedir a extreure les mostres de la cambra.



Fig. 3.9: Cambra de carbonatació vista pel davant i pel darrere.

3.3. ASSAJOS REALITZATS

3.3.1. Assaig de conductivitat tèrmica.

L'assaig de conductivitat tèrmica és una assaig no destructiu que ens serveix per a determinar tres valors: la conductivitat tèrmica, el calor específic i la difusivitat tèrmica.

Conductivitat tèrmica (λ)

És la propietat que mesura la capacitat d'un material a conduir la calor, és a dir, la facilitat amb que la calor passa per un material. Tècnicament és la quantitat de calor que passa per unitat de temps a través d'una secció de material. En el sistema internacional es mesura amb $W/m \cdot K$

Calor específic (c_p)

És una magnitud física que indica la capacitat d'un material per emmagatzemar energia interna en forma de calor. De manera formal és la quantitat de calories d'energia necessària per elevar un 1K la temperatura d'1g de massa. En el sistema internacional és mesura amb $J/m^3 \cdot K$

Difusivitat tèrmica (α)

És la rapidesa amb la que varia la temperatura del material d'avant d'una sol·licitud tèrmica, com per exemple, una variació brusca de temperatura a la superfície. Un material amb una elevada difusivitat ajusta ràpidament la seua temperatura a la de l'ambient. En el sistema internacional es mesura amb $m^2 \cdot s$

La difusivitat tèrmica relaciona la conductivitat tèrmica i el calor específic amb la següent formula.

$$\alpha = \frac{\lambda}{c_p}$$

En aquest assaig, per determinar aquests valors, es va fer servir un dispositiu portàtil, el QUICKLINETM 30. Aquest dispositiu permet mesurar de forma directa les propietats de les nostres mostres. Per extreure les dades s'ha de col·locar la sonda sobre la mostra, després es posa en marxa la màquina i, en 10-15 minuts, apareixen els resultats a la pantalla.

Es van realitzar assajos en totes les mostres quadrades.



Fig. 3.10: Conductímetre QUICKLINETM 30 i detall de la sonda.

3.3.2. Resistència al foc

L'assaig de resistència al foc consisteix en sotmetre, en un forn, les plaques a una pujada de temperatures segons una corba normalitzada temps-temperatura (definida en la norma UNE EN 1363:2000). En aquest cas, però, s'ha considerat que no es necessitava seguir la corba perquè, amb menys temperatura, es podia arribar igualment a la combustió. Així, s'han sotmès les plaques a una pujada fins als 500°C durant una hora i, una vegada arribada a aquesta temperatura, s'ha mantingut durant dues hores.

La realització d'aquest assaig pretén observar els efectes del foc tant en els lligams com en la palla, treballant conjuntament. En primer lloc, amb l'observació de la proveta i les modificacions que pot sofrir: canvis de coloració, fissuració, segregació i tots els canvis que es poden observar a cop d'ull; en segon lloc, mitjançant les dades recollides per l'equip d'assaig, en forma de gràfiques.

Descripció de la maquinària

Per a la realització de l'assaig serà necessària la utilització d'un forn que en permeti la col·locació de les plaques- També ens haurà de permetre arribar a la temperatura desitjada per a l'assaig. Així per a la realització d'aquest assaig es va fer servir un forn HOVERSAL de tipus mufla que hi ha al laboratori del foc de l'EPSEB.

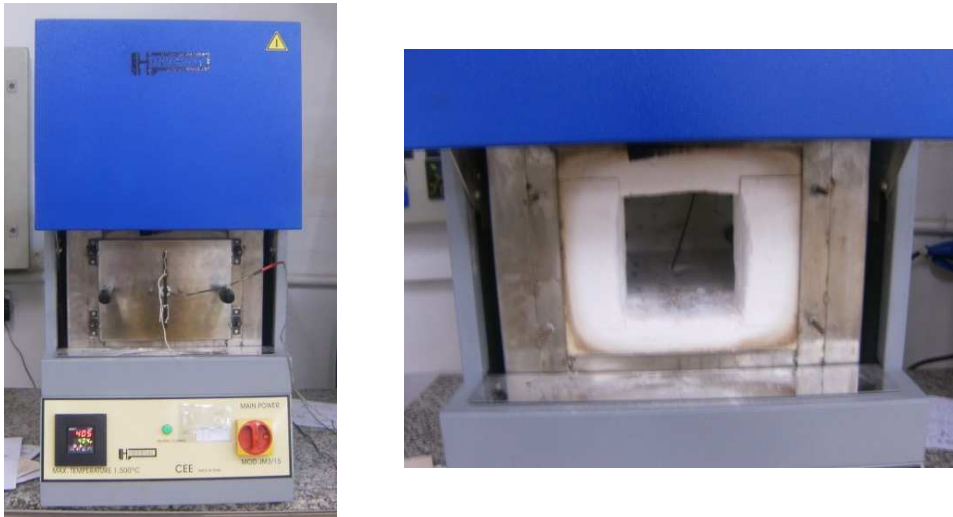


Fig. 3.11: Forn HOVERSAL.

Per a la recollida de dades s'instal·laran dos termoparells: un d'interior, que mesurarà la temperatura de la superfície interior de la placa i l'altre exterior, que mesurarà la temperatura en la superfície exterior. Aquets termoparells es connectaran a un *datalogger*, que registrarà la temperatura, per a després poder guardar les dades dels assajos a l'ordinador. També es farà servir la bàscula per pesar la mostra abans i després de l'assaig, i així conèixer la pèrdua de pes.



Fig. 3.12: Datalogger.

Descripció de l'assaig

El forn disposa d'una porta especial que permet col·locar la placa per realitzar l'assaig. Abans, s'ha de preparar la placa fent-li uns forats que ens ajudaran a subjectar-la. Es pesa la mostra amb la bascula. Una vegada subjectada la placa a la porta, es posa al seu lloc, s'endollen els termoparells al *datalogguer* i es posa en marxa el forn. Quan el forn acaba el cicle es trau la porta i es torna a pesar la placa.



Fig. 3.13: Procediment de l'assaig.

3.3.3. Comportament mecànic

Per comprovar l'efecte que té el foc en elements que contenen palla en quant al seu comportament mecànic s'han realitzat assajos comparatius. De les sis mostres fabricades de cada tipus, tres s'han assajat després d'haver carbonitzat la palla en un forn i la resta s'han assajat sense passar pel forn.

Assaig termogravimètric

A l'hora de saber a quina temperatura ha d'estar sotmesa la palla per a carbonitzar, hem realitzat un assaig termogravimètric. Aquest assaig es realitza amb un forn adaptat que ens permet recollir les dades de pes i temperatura.



Fig. 3.14: Forn adaptat per a la realització del termogravimètric.

Descripció de l'assaig

Es col·loca en un recipient especial una petita quantitat del material a assajar. A continuació es posa al forn, s'introdueix un termoparell dins del material i es posa en marxa el forn (que està programat per a fer una pujada contínua de temperatura fins als 1000°C). Quan el forn acaba el cicle, es copien les dades que ha recollit l'ordinador i obtenim una gràfica pes/temperatura.

Resultats de l'assaig termogravimètric

La següent gràfica és el resultat de l'assaig termogravimètric. L'assaig comença amb una mostra d'un pes de 2,373g i acaba amb un pes de 0,186g. Es pot observar com la pèrdua de pes més acusada comença al voltant dels 230°C, com esta senyalat a la figura 3.15, que es mostra seguidament.

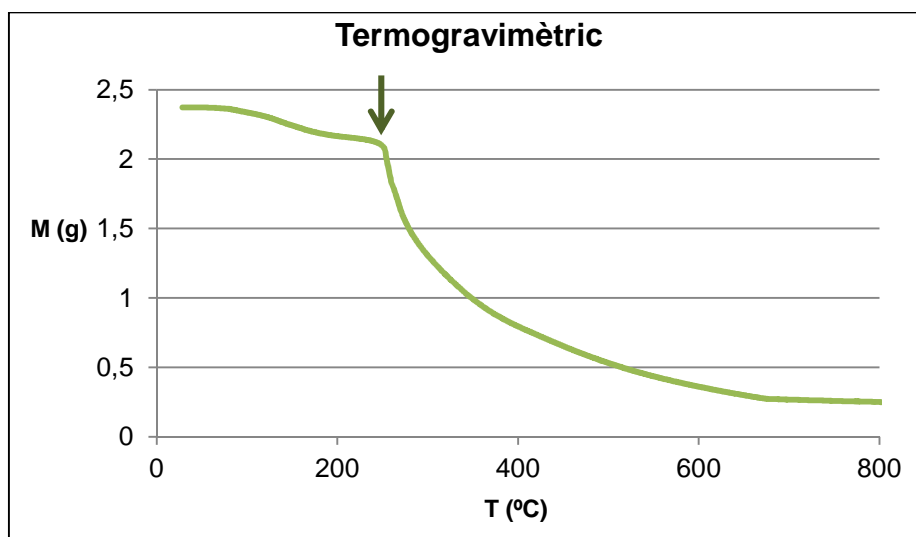


Fig. 3.15: Gràfic termogravimètric (pes/temperatura).

Si fem la derivada dels resultats recollits, obtindrem la unitat de pes perdut en cada unitat de temperatura. Això ens permet saber, amb major exactitud, la temperatura on la palla perd més massa. La gràfica següent (figura 3.16) ens mostra, que la major pèrdua de pes es produeix als 254 °C, on es perden 0,037g.

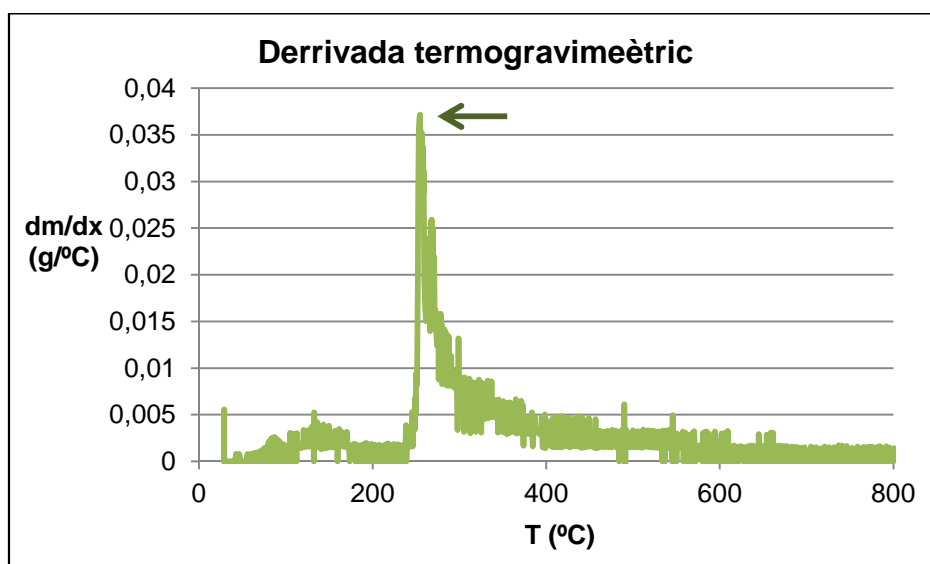


Fig. 3.16: Gràfic resultant de derivar el termogravimètric (pes/temperatura).

A la vista dels resultats del termogravimètric, es va decidir que, per carbonitzar la palla, es posarien les mostres al forn a 250 °C durant dues hores.

Microcalorímetre de piròlisi

Per seguir amb la caracterització de la combustió de la palla, aprofitant l'equipament present al laboratori del foc de l'EPSEB, s'ha realitzat també assaig amb el Microcalorímetre de piròlisi.

Per a la realització de l'assaig es necessita un microcalorímetre de piròlisi i una bascula de superprecisió.

El microcalorímetre de piròlisi és un equip que permet determinar el ritme d'alliberament de calor de mostres de materials combustibles. La mostra, de massa molt petita (pocs mil·ligrams), és escalfada, primer, a ritme constant de temperatura en un compartiment pirolitzador. Els gasos generats són escombrats del pirolitzador per un flux de gas inert (nitrogen). La corrent de gas es barreja, llavors, amb oxigen i entra en una càmera de combustió a 900°C, on els gasos combusionen completament. A partir de la mesura de la disminució d'oxigen es determina el flux d'alliberament de calor HRR (*heat release rate*). El resultat és un gràfic on es representa el HRR (expressat en watts/gram) en funció de la temperatura d'escalfament.

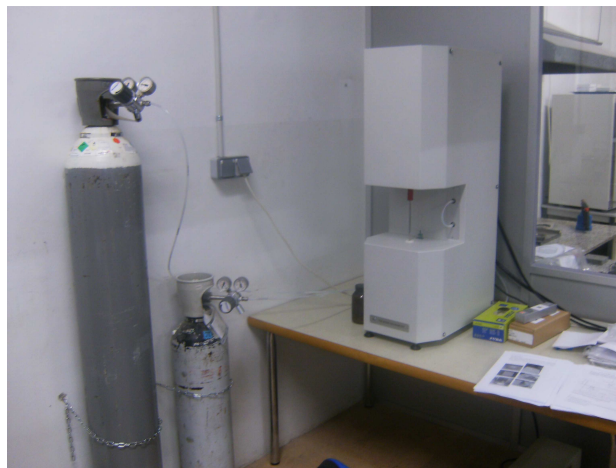


Fig. 3.17: Microcalorímetre de piròlisi

S'ha utilitzat una mostra de 10.9mg, i s'ha escollit una rampa de temperatura d'1 °C/s.

El software de l'equip permet recollir les dades, graficar-les, i calcular les integrals (àrees sota la corba) en el rangs seleccionats. En la figura s'observa que la mostra de palla inflama al voltant dels 200°C i té el màxim d'alliberament de calor, de 43.4 W/g, als 320°C. L'integral d'aquesta corba, per tot el rang de temps, dóna la calor de combustió total, que resulta de 6.9 kJ/g.

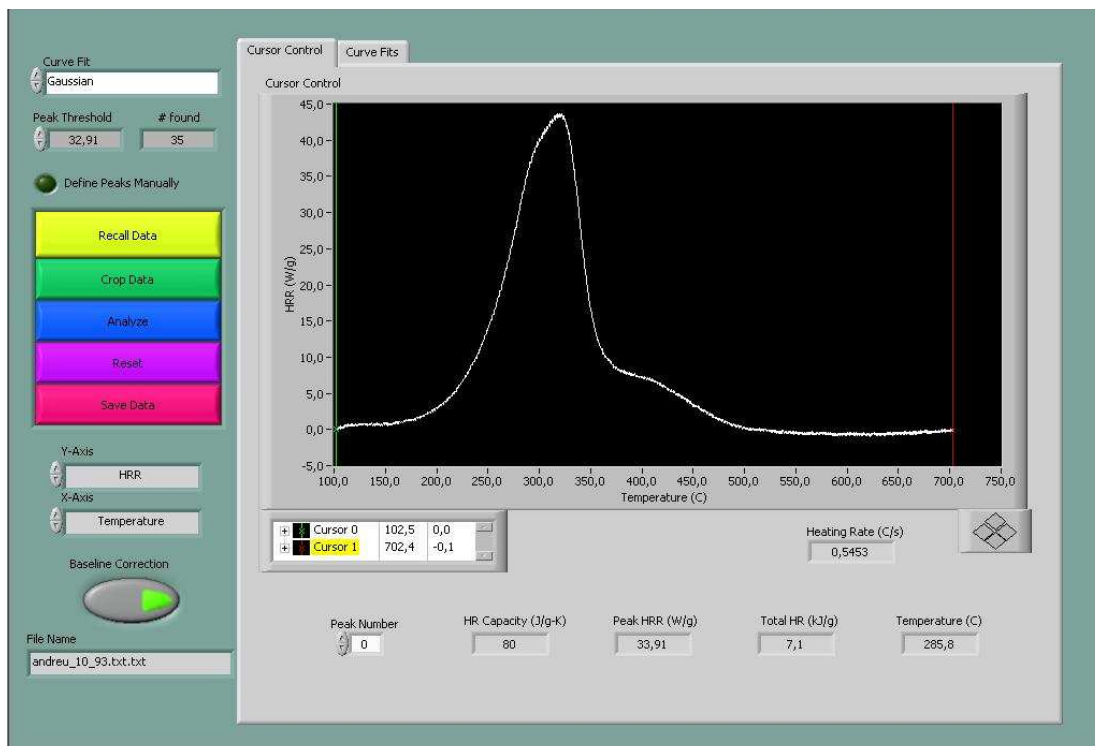


Fig. 3.18: Gràfica extreta del programari d'adquisició de dades del Microcalorímetre de piròlisi

3.3.3.1. Flexo-tracció simple

Aquest assaig ens proporcionarà la resistència a flexió de cada mostra. El resultat final de la resistència a flexió serà, en cada cas, la mitja de les tres provetes. La geometria de l'adaptador per a la realització de l'assaig està adaptada a la norma UNE EN 1015-11:2000/A1:2007.

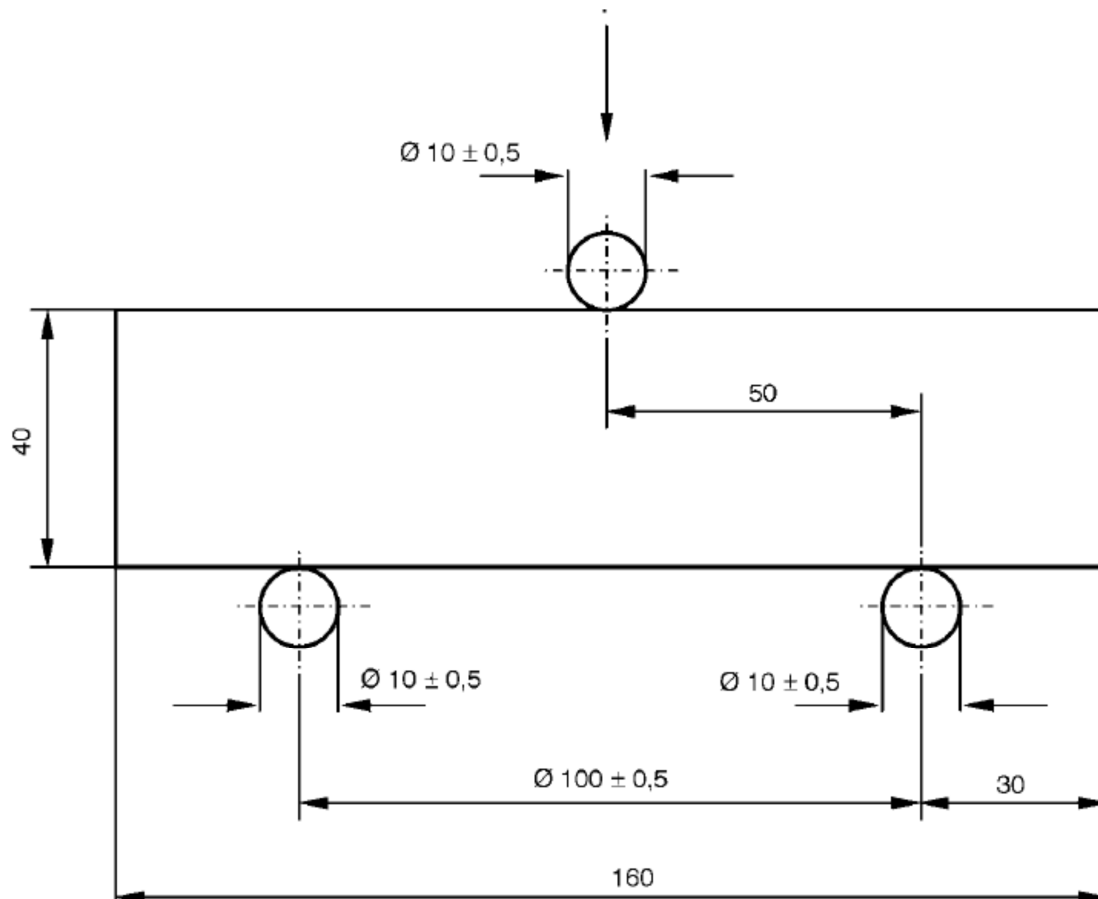


Fig. 3.19: Geometria de l'adaptador segons norma UNE EN 1015-11:2000/A1:2007.

Per calcular la resistència a flexió farem servir la següent fórmula:

$$R_{fi} = \frac{1,5 \cdot F_{fi} \cdot L}{b^3}$$

On:

R_{fi} = Resistència a flexió (megapascals)

F_{fi} = càrrega aplicada en el centre del prisma en el moment del trencament (newtons)

L = distància entre suports (mil·límetres)

b = Costat de la secció (mil·límetres)

Descripció de l'equip

Per poder realitzar l'assaig a flexo-tracció de les provetes prismàtiques, es va fer servir una premsa manual accionada per una manovella, amb un adaptador especial per a la realització d'aquest assaig i una cèl·lula que envia la força realitzada per la premsa a un equip informàtic.

L'adaptador per a la realització d'aquest assaig està compost per una part inferior fixa, on es troben dues barres rígides separades entre si per 10cm i que fan la funció de recolzament inferior. També, a la part inferior, ens trobem amb dos pivots metàl·lics que ens ajuden a l'hora d'alinejar la proveta i així eviten que aquesta quedi desplaçada durant l'assaig. A la part superior hi ha la zona mòbil de l'adaptador, format per un braç amb moviment vertical i acabat en una peça circular basculant, encarregada de transmetre la càrrega a la proveta.



Fig. 3.20: Premsa manual.

La cèl·lula que farem servir per a la realització de l'assaig s'ha d'adaptar a la resistència de les provetes que, posteriorment, assajarem. En aquest cas, la cèl·lula tenia una càrrega màxima de 500kg.

Per a la recepció de dades es va utilitzar un programa especialitzat que indicava la càrrega màxima rebuda durant l'assaig i la guardava en un arxiu.

Descripció de l'assaig

Per a la realització de l'assaig introduïm la proveta prismàtica a l'adaptador, la posem tocant els dos pivots per evitar que quedi torta i, després, la centrem longitudinalment. S'ha de tenir cura de no posar la cara superior de la proveta en contacte amb els pivots o els suports, ja que aquesta cara no ha estat en contacte amb les parets del motlle i és la més irregular.

Quan ja tenim la proveta al seu lloc, fem una precàrrega per ajustar la premsa el màxim possible a la superfície de la proveta, sense entrar en càrrega. Una vegada realitzat aquest ajustament, posem en marxa l'equip informàtic i comencem a carregar la proveta amb la manovella. Quan la proveta trenca, guardem les dades a l'ordinador i extraïem la proveta.

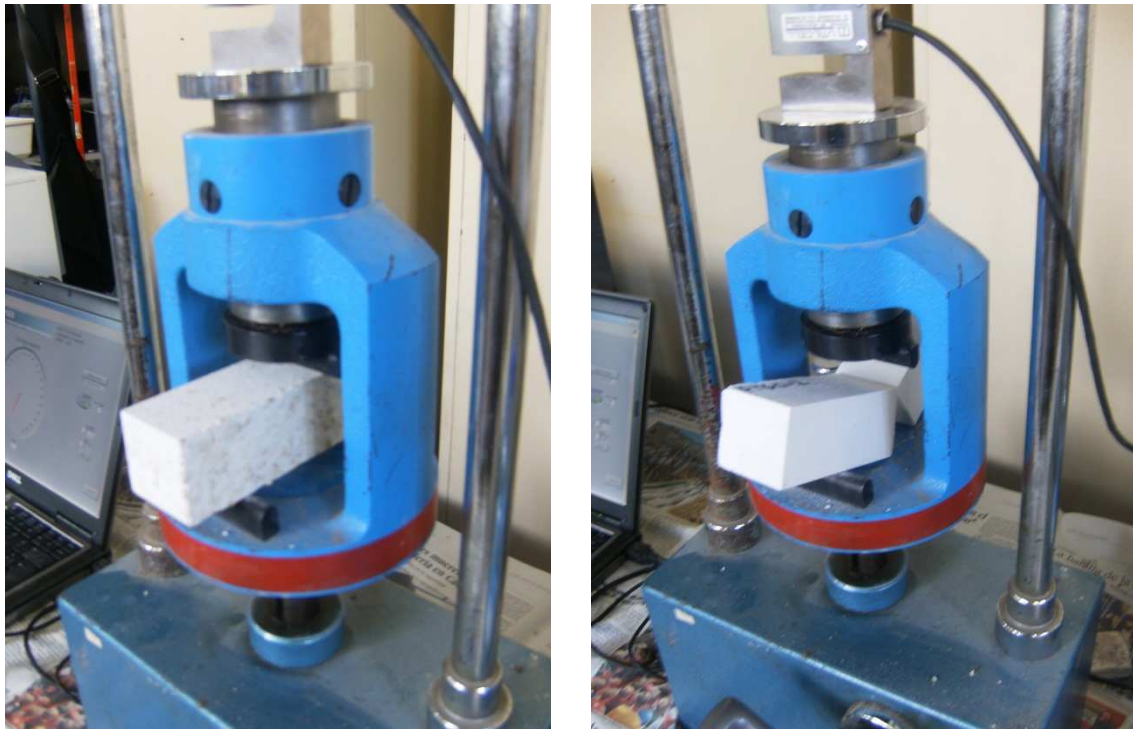


Fig. 3.21: Fases de l'assaig a flexotracció.

3.3.3.2. Compensió

Aquest assaig es realitzarà amb les dues meitats que queden després d'haver sotmès les provetes a flexió. L'assaig ens permetrà calcular la resistència a compressió. El resultat final de la resistència a compressió serà, en cada cas, la mitja de les sis provetes.



Fig. 3.22: Mitges provetes després de l'assaig a flexotracció.

Per calcular la resistència a flexió farem servir la formula següent:

$$R_{ci} = \frac{F_{ci}}{1600}$$

On:

R_{ci} = Resistència a compressió (megapascals)

F_{ci} = Càrrega màxima de trencament (newtons)

1600 = Superfície de la premsa 40x40mm (mm²)

Descripció de l'equip

A diferència de l'assaig a flexotracció, per realitzar l'assaig a compressió es va fer servir una premsa mecanitzada. Aquesta premsa conté una cèl·lula incorporada que suporta 10 tones, més que suficient, tenint en compte la resistència de les provetes a assajar.

L'adaptador per a aquest assaig és molt senzill i consisteix en dues bases oposades de dimensions 40x40 mm, sobre les que posem les provetes.

Per a la recollida de les dades es va utilitzar un dispositiu de recepció de dades que mostra la càrrega màxima de la premsa.



Fig. 3.23: Premsa mecànica.

Descripció de l'assaig

Per a la realització de l'assaig introduïm la mitja proveta prismàtica, assegurant-nos que no estigi torta centrànt-la longitudinalment. En aquest cas també s'ha de tindre en compte que la cara superior de la proveta no estiguen contacte amb les bases de l'adaptador.

Realitzem la precarrega per ajustar la premsa el màxim a la superfície, però sense entrar en càrrega. Una vegada realitzat l'ajustament, posem en marxa la premsa fins que la proveta trenca, parem la premsa, anotem la càrrega màxima en el bloc de notes del laboratori i extraiem la proveta.



Fig. 3.24. Fases de l'assaig a compressió.

3.4 RESULTATS

3.4.1. Assaig de conductivitat tèrmica.

Amb l'assaig de conductivitat tèrmica es busca conèixer la influència que té la palla en la conductivitat tèrmica d'un material.

A continuació es resumeixen, mitjançant tres gràfiques, els valors de conductivitat tèrmica de les plaques analitzades. La taula amb els resultats complets dels assajos es troba a l'annex II.

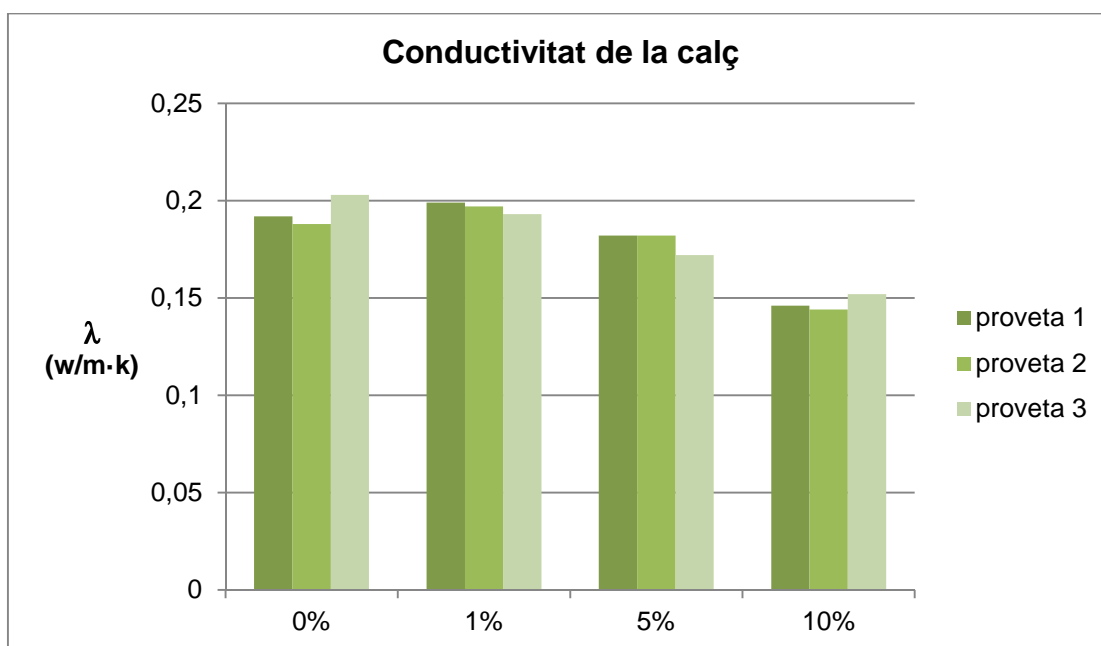


Fig. 3.25: Gràfica de la conductivitat tèrmica de la calç segons la quantitat de palla.

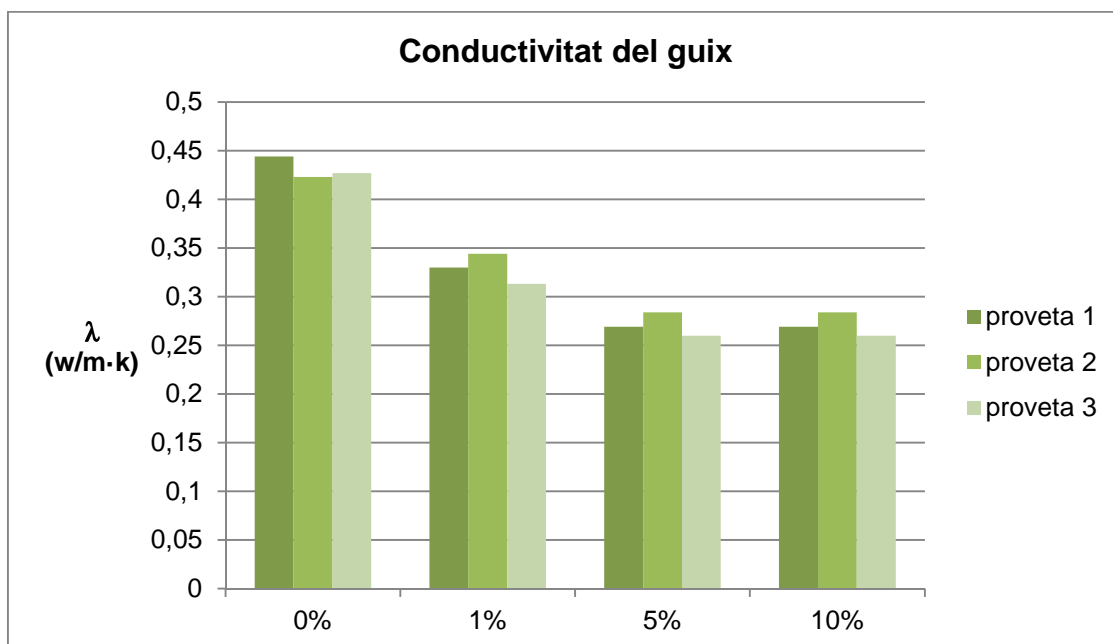


Fig. 3.26: Gràfica de la conductivitat tèrmica del guix segons la quantitat de palla.

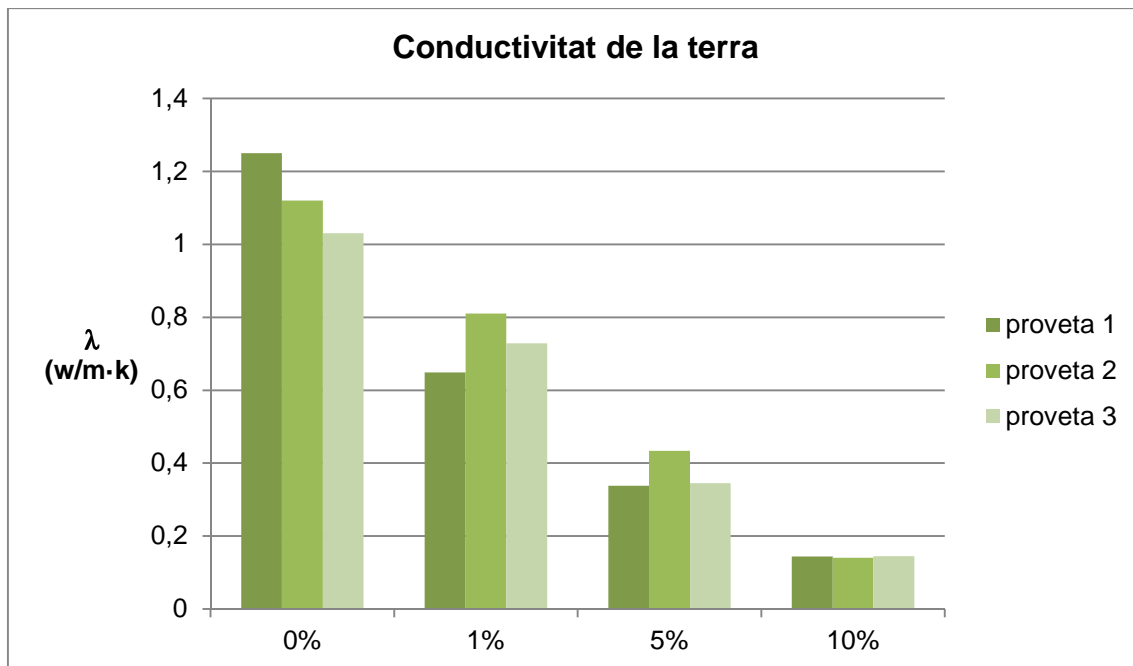


Fig. 3.27: Gràfica de la conductivitat tèrmica de la terra segons la quantitat de palla.

La següent gràfica comparativa ens mostra la diferència que hi ha a la conductivitat tèrmica segons el material de lligam. Crida l'atenció que la terra passa de ser el lligam amb més conductivitat tèrmica a ser el lligam amb menys conductivitat tèrmica, amb el 10% de contingut de palla.

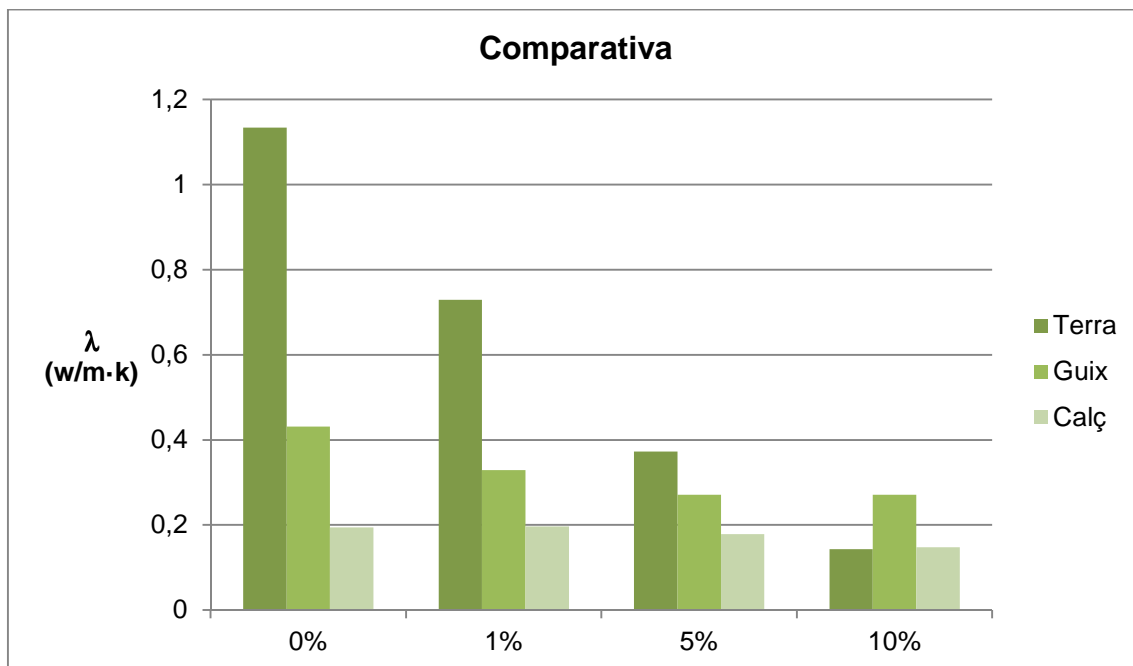


Fig. 3.28: Gràfica comparativa de la conductivitat tèrmica de la calç segons la quantitat de palla i el tipus de lligam.

Conclusions

- L'aportació de palla a una pastada afavoreix la reducció de la conductivitat tèrmica del material resultant.
- El lligam amb menys conductivitat tèrmica és la calç ($0,194 \text{ w/m}\cdot\text{k}$) i el lligam amb més conductivitat tèrmica és la terra ($1,133 \text{ w/m}\cdot\text{k}$).
- Al material que menys influeix l'aportació de palla, en quant a la reducció de la conductivitat tèrmica, és la calç. Passa d'una conductivitat mitja, amb el 0% d'aportació de palla de $0,194 \text{ w/m}\cdot\text{k}$, a una conductivitat mitja amb el 10% d'aportació de palla, del $0,147 \text{ w/m}\cdot\text{k}$.
- Al material que més influeix l'aportació de palla, en quant a la reducció de la conductivitat tèrmica, és la terra. Passa d'una conductivitat mitja, amb el 0% d'aportació de palla de $1,133 \text{ w/m}\cdot\text{k}$, a una conductivitat mitja amb el 10% d'aportació de palla, del $0,147 \text{ w/m}\cdot\text{k}$.

3.4.2. Resistència al foc.

Com s'ha presentat anteriorment, hi ha dos formes de veure els resultats de l'assaig de resistència al foc. En primer lloc, observant canvis físics en les provetes que es puguin veure a cop d'ull i, en segon lloc, observant les dades registrades durant la realització dels assajos; és a dir, les corbes de temperatura registrades amb els termoparells.

A continuació podrem veure, en cada lligam, els canvis que es podien observar en les provetes una vegada assajades.

Com podem veure en les a continuació (figura 3.27), les provetes de calç mostren un canvi brusc de color una vegada assajades. La superfície es carbonitza i hi ha segregació de material en forma de pols. La proveta es veu molt afectada per l'assaig.

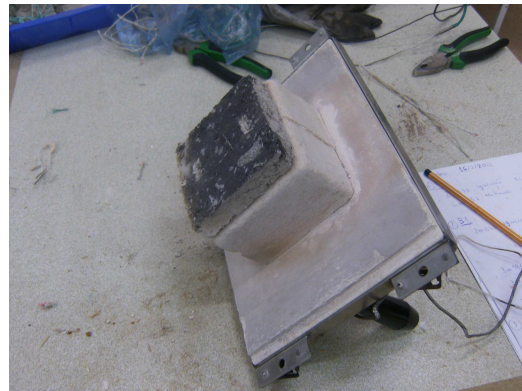


Fig. 3.29: Proveta de calç abans i després de de l'assaig.

En el cas del guix, podem observar com la palla, que en primer lloc es veia en la proveta, ara està carbonitzada; el lligam, en canvi, no mostra cap canvi de coloració ni esquerda visible. Pareix que, a part de la carbonització de la palla, la proveta no es veu molt afectada per l'assaig.

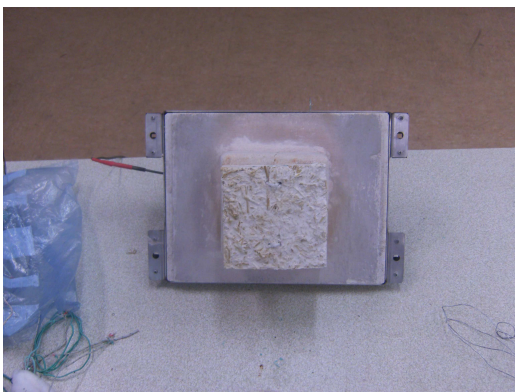


Fig. 3.30: Proveta de guix abans i després de de l'assaig.

Per altra banda, la proveta de terra presenta diferents reaccions al foc, depenent de la quantitat de palla afegida. Mentre que en la placa sense contingut de palla no hi ha afectació visible, la placa amb un contingut del 10% de palla es segrega totalment en acabar l'assaig.



Fig. 3.31: Proveta de terra abans i després de de l'assaig.

Una vegada realitzat l'anàlisi visual de les plaques, passarem a estudiar els resultats obtinguts pel programari d'adquisició de dades. Aquests resultat es representa en forma de gràfica temperatura/temps. A continuació mostrarem les gràfiques comparatives més representatives, ja que les gràfiques tipus de cada tipus de proveta es troben representades en l'annex III d'aquest projecte.

Cada gràfica correspon a un tipus de lligam i mostra la pujada de temperatura de la cara interior segons el percentatge de palla. D'aquesta manera es pot observar: primer una augment constant de la temperatura, després una zona plana (de pèrdua d'aigua del material); seguidament, en alguns casos, d'un pic de combustió, que és més acusat amb quantitats més altes de palla. Solament en la gràfica de resistència al foc del guix hi apareix la corba de temperatura de cara exterior del forn, que en una hora arriba als 500°C i es manté durant dues hores.

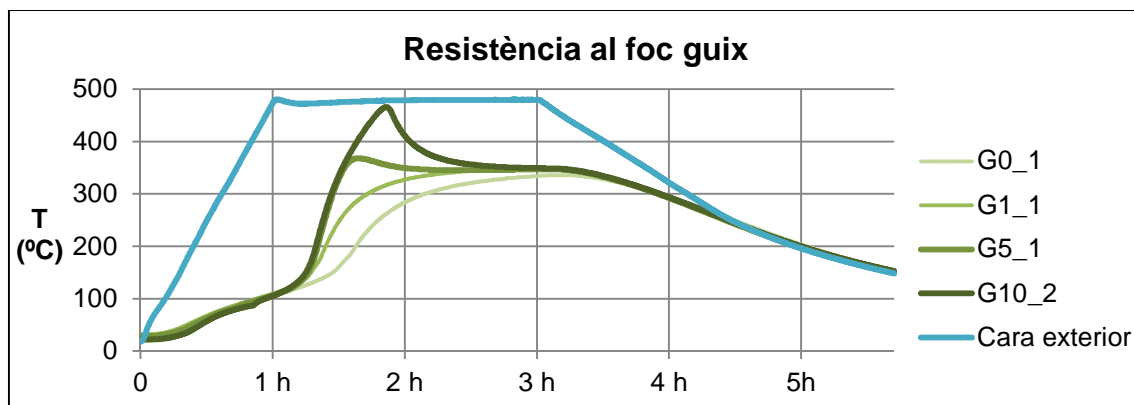


Fig. 3.32: Gràfica comparativa de la resistència al guix segons la quantitat de palla incorporada.

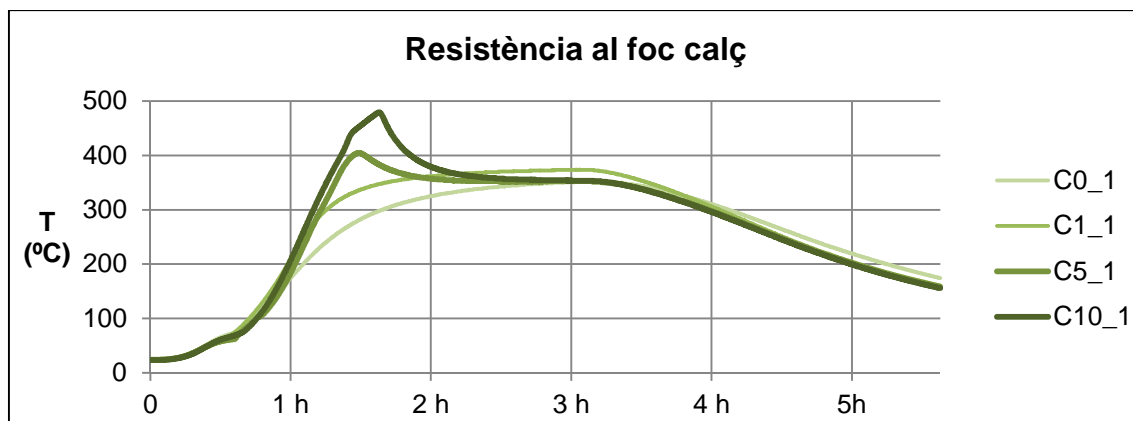


Fig. 3.33: Gràfica comparativa de la resistència de la calç segons la quantitat de palla incorporada.

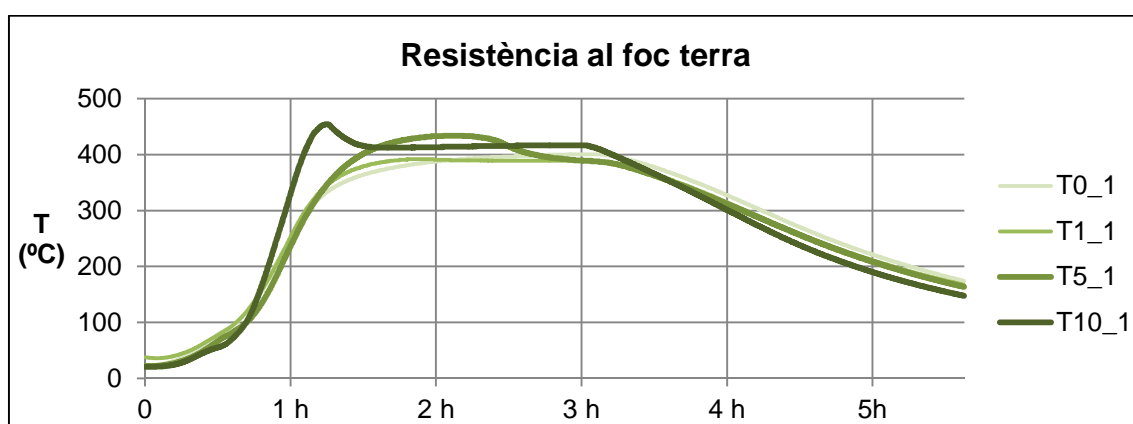


Fig. 3.34: Gràfica comparativa de la resistència de la terra segons la quantitat de palla incorporada.

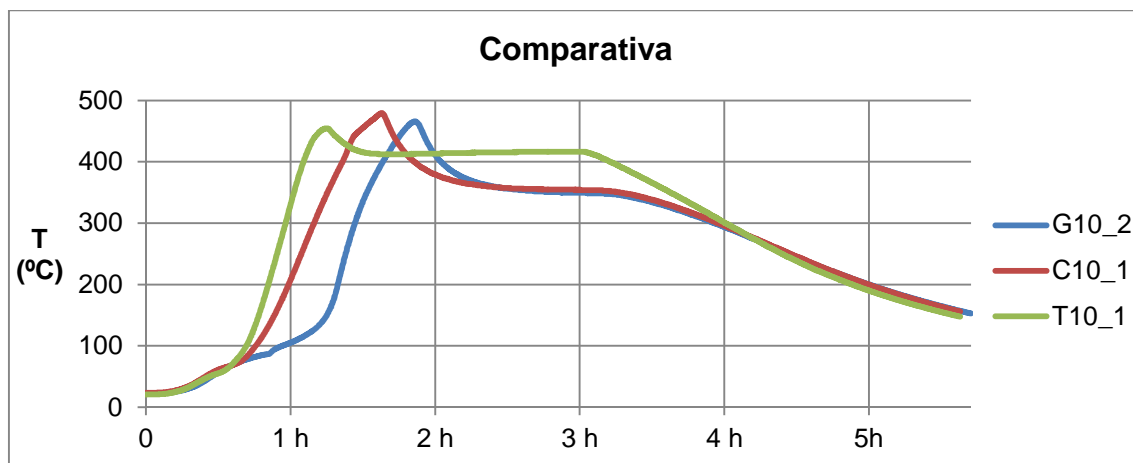


Fig. 3.35: Gràfica comparativa de la resistència al foc dels diferents tipus de lligam amb un 10% de palla incorporada.

Les tres primeres gràfiques comparen la temperatura de la cara exterior de les plaques fabricades amb un mateix lligam, però amb diferents quantitats de palla afegida a la mescla. Els pics de la gràfica ens indiquen la combustió de la placa i, d'aquesta manera, podem observar amb quina intensitat i quan es produeix la combustió.

L'última gràfica compara la temperatura de les plaques en la cara exterior dels tres lligams amb una incorporació de palla del 10%. Es pot observar que la placa que més prompte combustiona és la que està fabricada amb terra, al voltant de l'hora i quart. La placa fabricada amb calç combustiona a l'hora i mitja, mentre que la placa que més tard combustiona, la del guix, ho fa a l'hora i tres quarts aproximadament.

Conclusions

Un cop analitzats els resultats obtinguts de l'assaig podem extreure les següents conclusions.

- Les provetes fabricades amb terra resisteixen molt bé al foc, ja que no presenten pics de combustió fins que el contingut de palla no és del 10%. En aquest cas, però, la proveta està fabricada amb el material que pitjor funciona davant del foc, ja que és el que combustiona més prompte, més ràpid i, a més, la placa es disgrega totalment.
- Les plaques fabricades amb un contingut de palla del 0 al 1% no presenten pic de combustió, sigui quin sigui el lligam utilitzat per a la seua fabricació.

3.4.3. Comportament mecànic

A continuació es presenten les gràfiques dels resultats obtinguts de sotmetre les provetes prismàtiques a flexotracció. Les gràfiques que es mostren a continuació són les més representatives, les que comparen les provetes assajades a temperatura ambient i les provetes assajades una vegada carbonitzada la palla. Les provetes de terra amb un contingut del 10% de palla que van passar pel forn no es van poder assajar perquè es van segregar totalment. Els valors representats en la gràfica són la mitja de les tres provetes assajades de cada tipus.

La resta de gràfiques estan representades en l'annex IV d'aquest projecte.

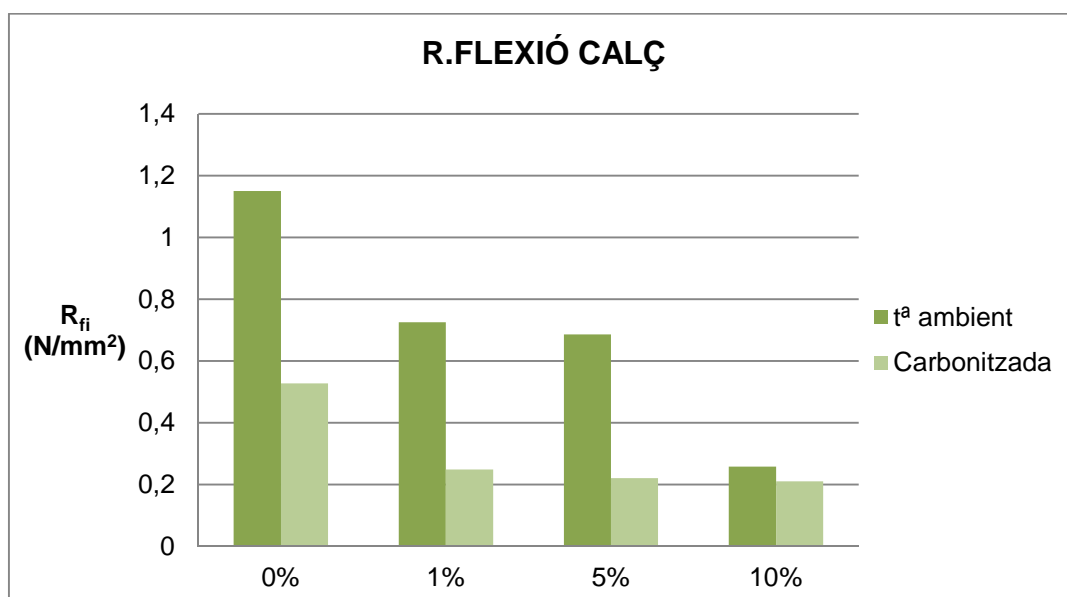


Fig. 3.36: Gràfica comparativa de la resistència a flexió de la calç en les provetes assajades a temperatura ambient i les que han passat pel forn a 250°C.

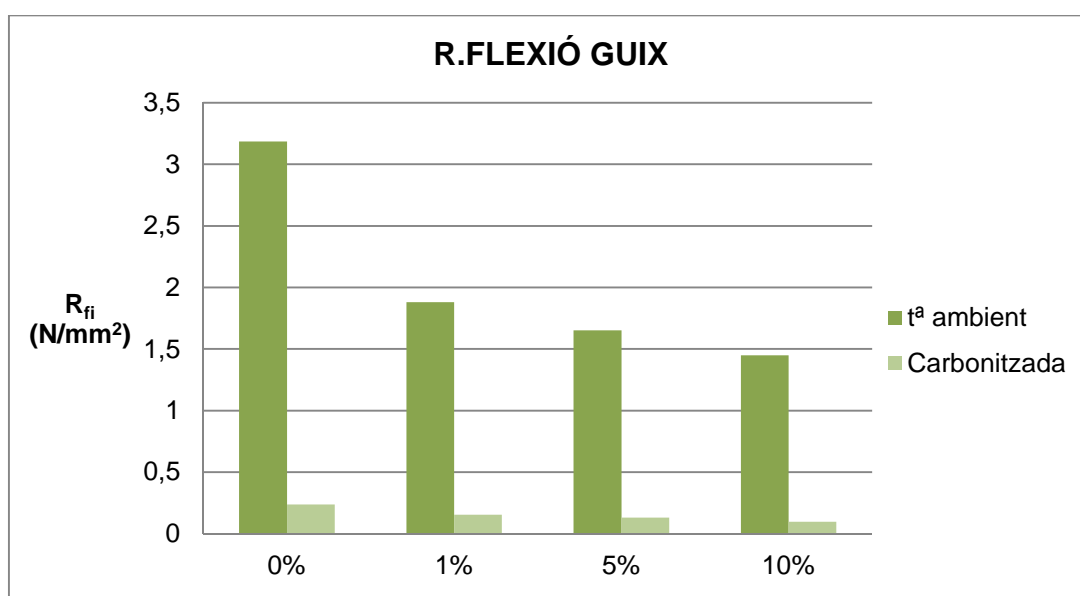


Fig. 3.37: Gràfica comparativa de la resistència a flexió del guix en les provetes assajades a temperatura ambient i les que han passat pel forn a 250°C.

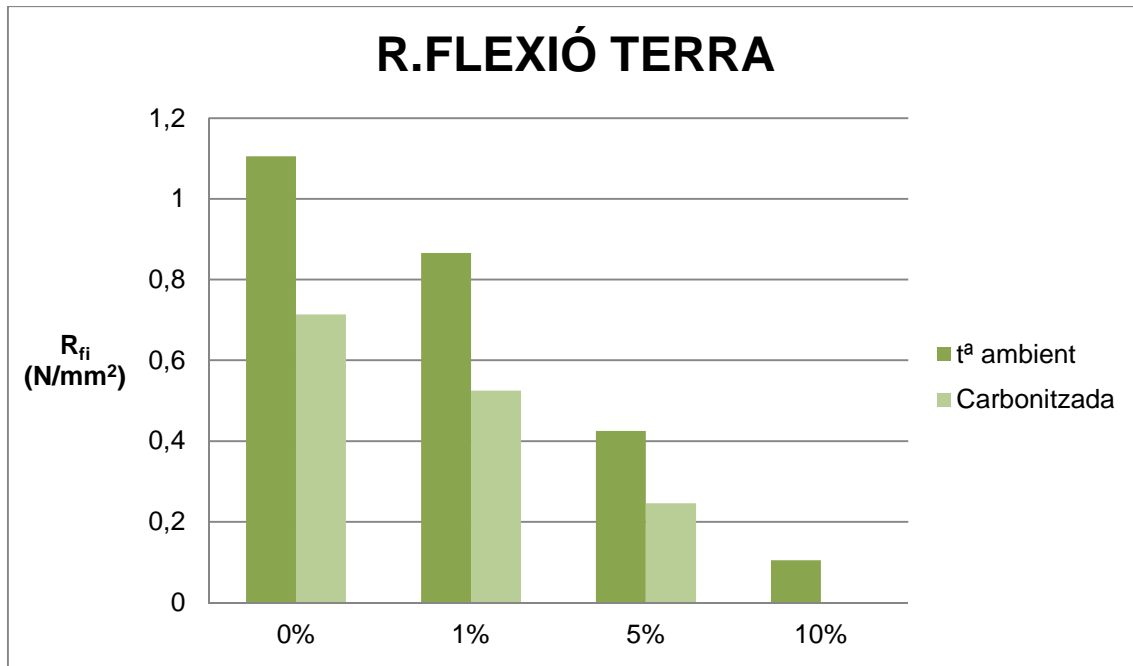


Fig. 3.38: Gràfica comparativa de la resistència a flexió de la terra en les provetes assajades a temperatura ambient i les que han passat pel forn a 250°C.

Conclusions

- El material amb una millor resistència a flexió a temperatura ambient és el guix. En totes les seues variants supera amb escreix la resta de materials.
- El material que es veu més afectat en quant a la resistència a flexió una vegada carbonitzada la palla és el guix.

A continuació es presenten les gràfiques dels resultats obtinguts de sotmetre les meitats de les provetes resultants de l'assaig a flexotracció, a compressió. Les gràfiques que es mostren a continuació són les més representatives, les que comparen les provetes assajades a temperatura ambient i les provetes assajades una vegada carbonitzada la palla. Les provetes de terra amb un contingut del 10% de palla que van passar pel forn no es van poder assajar perquè es van segregar totalment. Els valors representats en la gràfica són la mitja de les sis provetes assajades de cada tipus.

La resta de gràfiques estan representades en l'annex V d'aquest projecte.

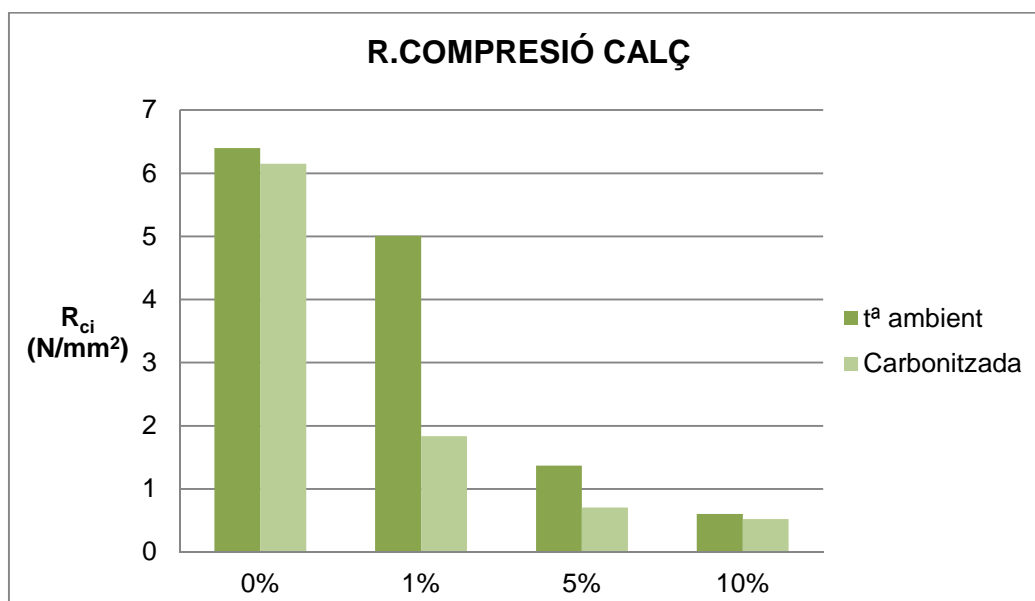


Fig. 3.39: Gràfica comparativa de la resistència a compressió de la calç en les provetes assajades a temperatura ambient i les que han passat pel forn a 250°C

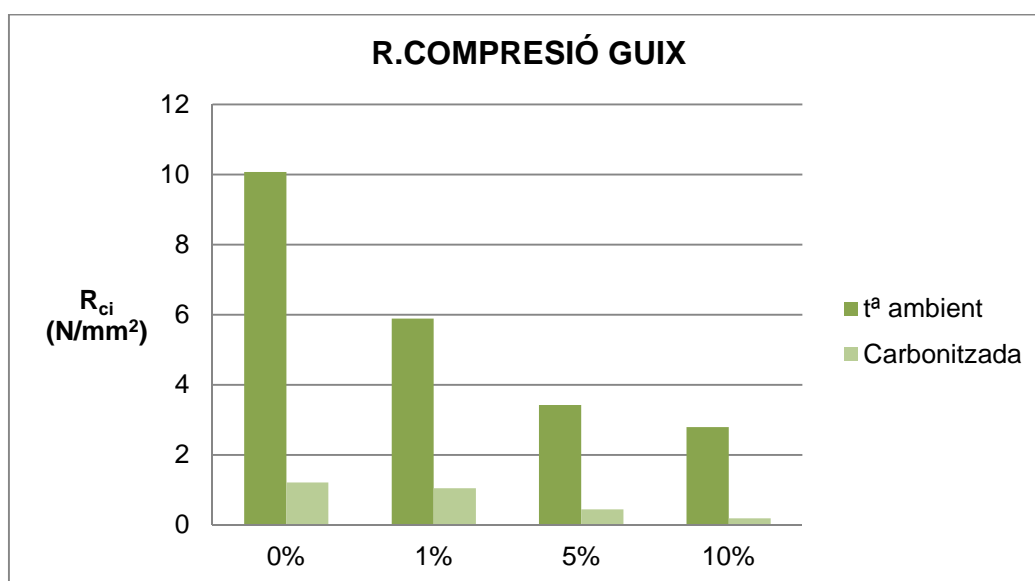


Fig. 3.40: Gràfica comparativa de la resistència a compressió del guix en les provetes assajades a temperatura ambient i les que han passat pel forn a 250°C

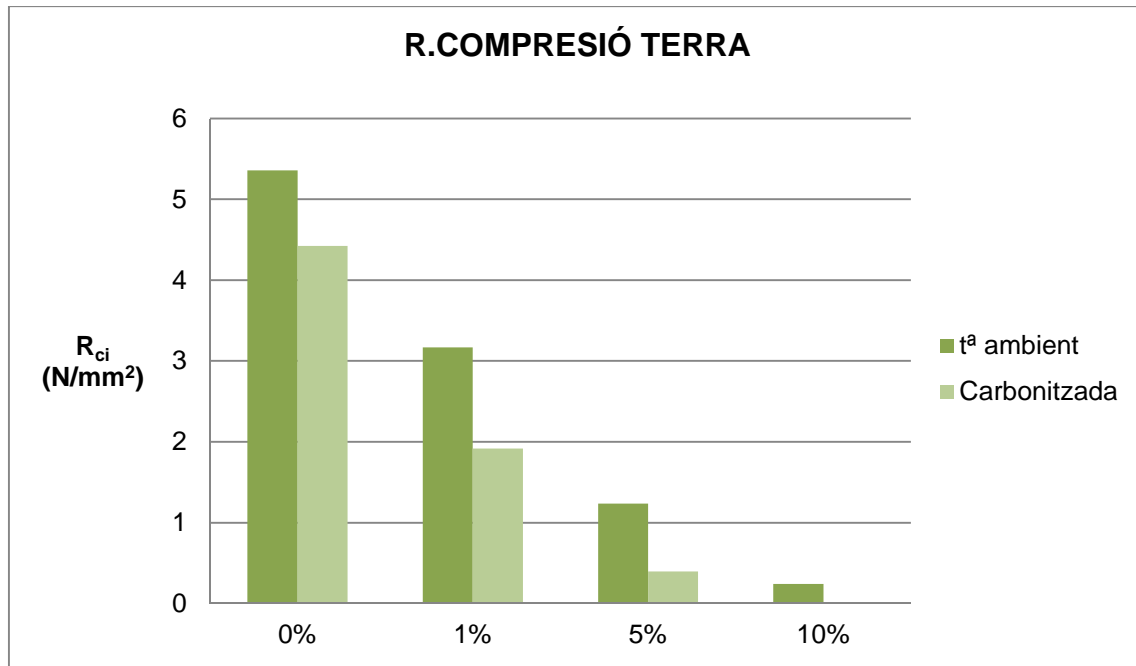


Fig. 3.41: Gràfica comparativa de la resistència a compressió de la terra en les provetes assajades a temperatura ambient i les que han passat pel forn a 250°C

Conclusions

- El material amb una millor resistència a compressió a temperatura ambient és el guix. En totes les seues variants supera amb escreix la resta de materials.
- El material que es veu més afectat en quant a la resistència a compressió, una vegada carbonitzada la palla, és el guix.
- Com més quantitat de palla hi ha en proveta, menor és la resistència a compressió.

CONCLUSIONS

Per a la confecció d'una part d'aquest projecte s'ha realitzat, en primer lloc, una recerca i aglutinament del coneixement tècnic existent i, en segon lloc, s'ha realitzat diferents tipus d'assaig que ens ha permès conèixer l'influència que té la presència de la palla en diferents tipus d'elements compostos

Després d'haver cercat la informació existent al voltant de la palla com a material de construcció, s'ha arribat a les següents conclusions:

- En les noves tècniques de construcció amb palla queda encara molt per investigar.
- La construcció amb bales de palla es presenta com una alternativa viable i en creixement per a la construcció d'habitatges amb un baix impacte ambiental.
- Els materials compostos que incorporen palla ja funcionaven fa milers d'anys

També, un cop analitzats els resultats obtinguts, s'ha arribat a les següents conclusions:

- L'adició de palla a un material afavoreix la reducció de conductivitat tèrmica i, per tant, millora el seu aïllament tèrmic.
- L'adició de palla a un material no millora en general les seues capacitats mecàniques.
- Sobretot en les provetes fabricades amb terra s'ha vist que, quan s'incorpora un 1% de palla, no presenten pic de combustió i les seues capacitats mecàniques no empitjoren, en canvi redueix la seua conductivitat tèrmica.
- Si un material que incorpora palla s'exposa a una temperatura igual o superior a la de la combustió de la palla, empitjora molt les seues capacitats mecàniques.
- El material que es veu més afectat, en quant a la resistència a flexió una vegada carbonitzada la palla, és el guix.
- El material amb una millor resistència a compressió a temperatura ambient és el guix. En totes les seues variants supera amb escreix la resta de materials.
- El material que es veu més afectat en quant a la resistència a compressió, una vegada carbonitzada la palla, és el guix.

Una possible investigació arrel d'aquest projecte podria ser la combinació, per capes, de materials amb gran quantitat de palla, amb altres més resistents al foc i mecànicament però no tan aïllants.

AGRAÏMENTS

Des d'aquest petit racó voldria aprofitar per donar les gràcies a tota la gent que m'ha ajudat en la realització d'aquest projecte d'alguna manera i, per tant, ha fet possible que ara mateix l'estiguis llegint.

Primer, donar les gràcies als meus tutors del projecte Ana i Joan Ramon, primer per acceptar ser els tutors del meu projecte i després pel suport i assessorament rebut durant el curs.

També voldria agrair a tota la gent en la que he compartit el laboratori del foc i de materials durant aquest temps, per estar disposats sempre a explicar i ajudar-me a l'hora de fer els assajos, en especial al Josep i la Laia.

La gent de fora de l'escola també ha fet molt per tirar endavant aquest projecte. Per això, voldria donar les gràcies, en primer lloc, a la família Vallès Barreda, per acollir-me a casa seua. A Paloma, que sap que sense ella el projecte no seria el que és. I per últim i sobretot gràcies a la meua família per estar al meu costat.

REFERÈNCIES BIBLIOGRÀFIQUES

- [1] CARRO, Francisco Javier (2007): "Introducción a la paja" p.10, dins *Construcción con balas de paja. Estudio de las propiedades de la paja embalada y su utilización como material de construcción*, A Coruña, Projecte final de carrera.
- [2] "Superficies y producciones agrícolas" *Ministerio de agricultura, alimentación y medio ambiente*: <http://www.magrama.gob.es/es/estadistica/temas/estadisticas-agrarias/agricultura/avances-superficies-producciones-agricolas/>
- [3] NITZKIN, Rikki i TREMENS Maren (2010): "La historia de la construcción con paja" p.35, dins *Casas de paja. Una guía para autoconstructores*, Olba, Teruel, Ediciones Ecohabitar, ISBN – 978-84-614-2406
- [4] LLOYD, Kahn (1985): "Pacas de paja" p.56, dins de Cobijo, Herman Blume Ediciones, ISBN 84-87756-39-5
- [5] LAMACHE, Gustave (1921): Article "Fraiches en été chaudes en hiver, les maisons de paille sont avant tout économiques" de la revista *La Science et la vie* num. 56, p.31
- [6] S.O. Macdonald (1994): "...Y RESURGIMIENTO" dins d' *Edifique con fardos. Una guía paso a paso para la construcción con fardos de paja* p.14, editorial nobuko, ISBN: 0-9642821-0-0
- [7] Revista the last Straw: <http://www.thelaststraw.org/>
- [8] El 1995 a California "California Straw Bale Code", i el 1996 a Arizona "Annotated Prescriptive Building Code for Load-bearing and Non-Loadbearing Straw Bale Construction"
- [9] Xarxa Europea de Construcció amb bales de palla: <http://www.strawbale-net.eu/>
- [10] Xarxa Ibèrica de construcció amb bales de palla: <http://www.casasdepaja.org/>
- [11] S-HOUSE (2005) Böhleimkirchen, Austria: <http://www.s-house.at>
- [12] "Aislamientos ecológicos" p.22 dins la revista *EcoHabitar* Nº 30 Verano 2011 Olba, Teruel, Ediciones Ecohabitar.
- [13] AMAZONAIL PROJECTS: *Semidetached adorable housing, North Kesteven District Council, Waddington*. Projecte d'habitatges de protecció oficial, al Regne Unit.
- [14] KING Bruce i THEIS Bob (2007), *Design of Straw bale Building*, Chelsea Green, ISBN-13: 978-0976491118
- [15] MINKE, Gernot : "1. Introducción" p.9, dins de *Manual de construcción con fardos de paja*, Editorial Fin de Siglo
- [16] MINKE, Gernot (2001) *Building with Straw* p.23, ISBN-13: 978-3764371715
- [17] "Annotated Prescriptive Building Code for Load-bearing and Non-Loadbearing Straw Bale Construction"
- [18] AMAZONAIL PROJECTS: *Semidetached adorable housing, North Kesteven District Council, Waddington*. Projecte d'habitatges de protecció oficial, al Regne Unit.
- [19] Web d'Ismael Caballero: <http://ismana.es/>

-
- [20] CABALLERO, Ismael: *Manual de construcción con balas de paja encaladas*
- [21] NITZKIN, Rikki i TREMENS Maren (2010): "El sistema portante, autoportante o Nebraska" p.80, dins *Casas de paja. Una guía para autoconstructores*, Olba, Teruel, Ediciones Ecohabitar, ISBN – 978-84-614-2406.
- [22] MINKE, Gernot : "4. Construcción de muros con fardos de paja" p.19, dins *Manual de construcción con fardos de paja*, editorial fin de siglo
- [23] El seu web és: <http://www.arquitectura-y.paja.org>
- [24] Del web comercial de modcell: <http://www.modcell.com/>
- [25] CARRO, Francisco Javier (2007): "Aspectos normativos" p.266 dins de *Construcción con balas de paja. Estudio de las propiedades de la paja embalada y su utilización como material de construcción*, A Coruña, Projecte final de carrera
- [26] Xarxa de construccions en bales de palla de França: <http://www.compailons.eu/>
- [27] Xarxa de construccions en bales de palla de França: <http://www.compailons.eu/>
- [28] Stramen tech: <http://www.panneaudepaille.com/>
- [29] Panells de palla stramit: <http://www.stramit.co.uk/>
- [30] Resum del projecte FIVECO: <http://www.dip-badajoz.es/ficheros/gestordocumental/dlocal/resumen-proyecto-fiveco.pdf>
- [31] Blocs Oryzatech: <http://www.oryzatech.com/>
- [32] NITZKIN, Rikki i TREMENS Maren (2010): "Aspectos técnicos" p.203 dins de *Casas de paja. Una guía para autoconstructores*, Olba, Teruel, Ediciones Ecohabitar, ISBN – 978-84-614-2406
- [33]Diari d'Enginyeria i Ciències Aplicades <http://www.arpnjournals.com>
- [34] VARDY, Stephen I McDOUGALL, Collin, Compressive testing of plastered straw bales, The Journal of Green Building
- [35] Michael Faine y Dr. John Zhang, University of Western Sydney, Australia. *A Pilot Study examining and comparing the load bearing capacity and behaviour of an earth rendered straw bale wall to cement rendered straw bale wall.*
- [36] Bruce King i Bob Theis, *Desing ok Straw bale buildings*
- [37] CIDEMCO "Centro de investigacions avanzadas" N° INFORME: 18607-1
- [38] Nehemiah Stone amb els *Architectural Testing Labs*
- [39] Macbe, Joseph. *The thermal resistivity of Straw Bales for Construction*, Universitat d'Arizona 1993.
- [40] Matthew D. Summers, Sherry L. Blunk, Bryan M. Jenkins. *How Straw Descomposes: Implications for Straw Bale Construction*. California, 2003.
- [41] Carl J. Mas y E. Carr Everbach. *Acoustical Characterization of Straw Bales as Structural Elements* [on line]. St. Louis, Missouri. Acoustical Society of America, 1995

[42] Bruce King with René Dalmeijer. 260 p dins de *Design of straw bale buildings*, San Rafael, California. Editorial: Green Building Press. Any 2006 ISBN: 0-9764911-1-7

[43] Carl J. Mas y E. Carr Everbach. Acoustical Characterization of Straw Bales as Structural Elements [on line]. St. Louis, Missouri. Acoustical Society of America, 1995

[44] Darcey Donovan, Shannon Whitnack, Surkhab Khan i Bill Donovan. *Seismic Performance of Innovative Straw Bale Wall Systems* http://nees.unr.edu/projects/straw_bale_house.html

[45] Gionfranco Ottazzi P., Juan Felipe Yep L., MarcialBlondet, Gladys Villa Garcia, Juan F. Ginocchio C. Ensayos de simulacion sísmica de viviendas de adobe. Universidad Católica de Perú. Desembre 2008

[46] DOMINGUEZ, Luis de Villanueva i GARCIA Alfonso (2001): *Manual del yeso*, Madrid, CIE Inversiones editoriales- DOSSAT 2000, ISBN – 84-95312-46-8

[47] UNE EN 459-1:2002: Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.

[48]UNE EN 459-1:2002: Cales para la construcción. Parte 1: Definiciones, especificaciones y criterios de conformidad.